

تحلیل عدم قطعیت مدل‌های نفوذ آب در خاک با شبکه عصبی و روش آلفا-کات دشت

کوهدشت

مریم کبوده^{۱*}، علی محمد آخوند علی^۲، حیدر زارعی^۳، فخرالدین مرادی کیا^۴

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد گروه منابع آب، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- استاد گروه منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- استاد گروه منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۴- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

* نویسنده مسئول: Maryam.kabode2014@gmail.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۱۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۲۶

چکیده

در سال‌های اخیر، بحران آب، افت سطح آب‌های زیرزمینی و کاهش پایداری کشاورزی، اهمیت برآورد دقیق نرخ نفوذ آب در خاک را دوچندان کرده است. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های شش آزمایش نفوذسنجی، نفوذ آب در خاک با کمک پنج مدل گرین-آمپت، کوستیاکوف، هورتون، SCS و شبکه عصبی مصنوعی شبیه‌سازی شد. ارزیابی آماری نشان داد مدل SCS با دقت بالاتر و خطای کمتر نسبت به سایر مدل‌ها، عملکرد بهتری دارد و بعد از آن مدل شبکه عصبی مصنوعی در جایگاه دوم قرار داشت. برای بررسی عدم قطعیت مدل‌ها، روش فازی α -cut به کار رفت. نتایج نشان داد مدل شبکه عصبی مصنوعی کمترین عدم قطعیت (۱۱٪ تا ۲۱٪) و مدل SCS بیشترین عدم قطعیت (۶۱٪ تا ۸۸٪) را در برآورد نفوذ تجمعی دارد. نتایج تحلیل عدم قطعیت نشان می‌دهد که گرچه مدل SCS دقت بالاتری داشته است اما مدلی ناپایدارتر و حساس‌تر به پارامترهای ورودی بوده است. این نتیجه می‌تواند به عنوان یک دستاورد کلی مدنظر قرار گیرد که برای مقایسه مدل‌های مهندسی، علاوه بر دقت آماری مدل، ضروری است تحلیل عدم قطعیت و میزان اطمینان مدل نیز مورد بررسی قرار گیرد. به عنوان مثال، در این تحقیق ممکن است بدون تحلیل عدم قطعیت، روش SCS برای استفاده در اولویت باشد، اما با توجه به دقت و اطمینان‌پذیری شبکه عصبی مصنوعی انجام شده، این مدل می‌تواند در اولویت استفاده قرار گیرد. همچنین این یافته‌ها برتری مدل‌های داده‌محور را در مدیریت بهینه منابع آب تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل عدم قطعیت، دشت کوهدشت، شبکه عصبی مصنوعی، مدل‌سازی نفوذ آب، هم‌ارزی پارامترها.

مقدمه

تقسیم‌کننده از این رو، یکی از مهم‌ترین مراحل در چرخه هیدرولوژیکی محسوب می‌شود. Mukheibir, 2008; (Brouwer, 1988). با آگاهی از مقدار نفوذ در هر حوضه، می‌توان مقدار آب خروجی را با دقت بیشتری تخمین زد و از خسارت‌های احتمالی ناشی از سیل در مناطق سیل‌خیز جلوگیری کرد (Chahinian et al., 2005; Melone, 2004). علاوه بر این، رخداد بارش موجب افزایش سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی، جاری شدن آب زیر سطح زمین، فرسایش و افزایش محتوای رطوبتی خاک می‌شود؛ در سطح زمین، فرسایش و افزایش محتوای رطوبتی خاک می‌شود؛ در صورتی که تلفات

برای درک فرآیندهای هیدرولوژیکی، نفوذ به صورت غیرمستقیم اهمیت زیادی در توسعه و بقای منابع آب دارد (Irmak, 2012). فرآیند نفوذ، حرکت آب از سطح خاک به سمت پایین است (Dingman, 2008). این فرآیند وظیفه انتقال بخشی از بارش به سیستم خاک برای دسترسی ریشه گیاه را نیز بر عهده دارد. با توجه به رابطه میان نفوذ و آب موجود در خاک، در مناطقی مانند عرصه‌های طبیعی که بارندگی تنها منبع تأمین رطوبت خاک است، درک فرآیندها و الگوهای نفوذ اهمیت دوچندانی می‌یابد (Wang et al., 2008). نفوذ می‌تواند بارش را به دو بخش رواناب سطحی و زیرسطحی

(John and Nosa, 2009). در فصول مرطوب، به علت انبساط کانی‌های رسی، تخلخل‌های درشت کاهش یافته و نفوذپذیری در این خاک‌ها به حداقل می‌رسد که منجر به تبدیل بخش عمده باران به رواناب می‌شود (Mark et al., 2008). بنابراین، به دلیل وابستگی ضرایب معادلات نفوذ به نوع خاک و شرایط سطحی زمین، انجام آزمایش‌های میدانی برای اندازه‌گیری نفوذ، تعیین مدل مناسب و استخراج ضرایب در شرایط ویژه هر منطقه ضروری است (Rockström et al., 2014; Crescimanno et al., 2007).

ارائه مدلی جهت تعیین متوسط سرعت نفوذ در یک منطقه از نظر هیدرولوژیکی بسیار حائز اهمیت است. عموماً مدل‌های نفوذ به سه دسته فیزیکی، تجربی و نیمه‌تجربی تقسیم می‌شوند (Philip, 1975). مدل‌های فیزیکی با استفاده از قوانین اثبات شده مانند بقای جرم و انرژی و تلفیق آن‌ها در قالب معادلات ریاضی به دست آمده‌اند. مهم‌ترین مزیت این معادلات، امکان تعیین نرخ نفوذ با دانستن برخی خصوصیات فیزیکی خاک است. رویکرد دوم، استفاده از روابط تجربی است (Loaiciga and Huang, 2007). این مدل‌ها معمولاً ساختار ساده‌ای دارند و پارامترهای آن‌ها از طریق برازش بر منحنی نفوذ تجمعی استخراج می‌شوند (دشتکی و همکاران، ۱۳۸۸). تأثیرپذیری از شرایط زمانی و مکانی و ضعف در تبیین مفاهیم فیزیکی از نقص‌های عمده این معادلات است (محمدی و رفاهی، ۱۳۸۴). در مقایسه میان مدل‌های فیزیکی و تجربی، مشخص شده است که معادلات فیزیکی جزئیات فرآیند نفوذ را دقیق‌تر از مدل‌های تجربی نشان می‌دهند. مدل‌های مبتنی بر فیزیک شامل گرین-آپت، ریچاردز، فیلیپ، مرلیتکس و هاورکمپ، مدل‌های مفهومی دیسک، نازیمو و نش، و روابط تجربی نظیر هورتون را در این دسته قرار داده‌اند.

در ایران نیز مطالعات متعددی بر روی مدل‌های نفوذ و تغییرات مکانی پارامترهای آن انجام شده است. نشاط و همکاران (۱۳۸۶) با بررسی روش‌های مختلف تعیین سرعت نفوذ در ۳۲ منطقه از کشور، مدل‌های فیلیپ و SCS را برای زمان‌های طولانی و مدل کوستیاکوف را به عنوان مناسب‌ترین مدل کلی معرفی کردند. این نتایج در مورد مدل کوستیاکوف با یافته‌های سپهوند و همکاران (۱۳۹۰) در استان ایلام مطابقت دارد. محمدی کنگرانی و همکاران (۱۳۹۰) نیز با بررسی ارتباط تغییر کاربری اراضی و نفوذپذیری در حوزه آبخیز نکارود، مدل هورتون را برای این منطقه مناسب تشخیص دادند. قربانی دشتکی و همکاران (۱۳۸۷) تأثیر تغییر کاربری بر پارامترهای

بارش مشخص باشد، می‌توان پارامترهای فوق را محاسبه کرد (Chow, 2009).

سرعت نفوذ بیانگر ظرفیت خاک برای جذب آب است (Jones, 2014) و به حرکت آب در خاک، هدایت هیدرولیکی و ساختار خاک بستگی دارد (Philip, 1975). براساس پیش‌بینی Mudiare and Adewunmi (2000) تا سال 2050، تولید محصولات کشاورزی با گسترش اراضی یا تشدید چرخه آب به روش‌های مختلف از مقیاس محلی تا جهانی، تا ۷۰٪ افزایش خواهد یافت (Rockström et al., 2014). تبدیل اکوسیستم‌های طبیعی به زمین‌های کشاورزی باعث تغییر در میزان رواناب و تبخیر و تعرق می‌شود (Rost, 2008). همچنین توزیع زمانی این فرآیندها می‌تواند عواقبی چون فرسایش، رسوب‌گذاری، هدررفت مواد مغذی و تغییر در چرخه رطوبت هوا و آب‌های زیرزمینی به همراه داشته باشد. بنابراین، در مسائل مربوط به مدیریت منابع آب و خاک و برنامه‌ریزی هیدرولوژیکی، در نظر گرفتن ارتباط میان فرآیندها، پوشش زمین و نوع خاک ضروری است (Johnson, 1963).

با توجه به نقش کلیدی آب زیرزمینی در تأمین آب مناطق خشک و نیمه‌خشک، در دهه‌های اخیر ترکیب عوامل طبیعی (مانند تغییرات اقلیمی) و عوامل انسانی (برداشت بی‌رویه و مدیریت نامناسب) موجب افت تراز آب زیرزمینی و پیامدهای منفی در ایران شده است؛ از این رو پایش مستمر و شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در برنامه‌ریزی منابع آب ضرورت دارد (صاغی جدید، ۱۴۰۳؛ Nazemi et al., 1402).

همچنین اهمیت نفوذ در سرعت آلودگی‌های امتزاج‌پذیر یا ناپذیر در آب‌های زیرزمینی قابل توجه می‌باشد. در سال‌های اخیر، ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در برابر آلودگی‌های ناشی از افزایش فعالیت‌های انسانی، به دلیل پیامدهای آن بر سلامت انسان، اقتصاد و محیط‌زیست اهمیت فزاینده‌ای یافته است (کلانتری و همکاران، ۱۴۰۳).

اهمیت فرآیند نفوذ سبب شده است مدل‌های فیزیکی و تجربی گوناگونی به منظور کمی‌سازی آن ارائه شود (Delleur, 2007; Dingman, 2008). از آنجا که فرضیه‌ها و پارامترهای به کار رفته در هر یک از این مدل‌ها متفاوت است، کارایی آن‌ها براساس مبانی نظری و دسترسی به داده‌های مورد نیاز محدود می‌گردد (Sy, 2006). همچنین، به دلیل تغییرات پیوسته زمانی و مکانی ویژگی‌های خاک، تعمیم نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری همواره با چالش‌هایی همراه است و تغییرات مکانی خاک سبب نوسانات بسیار زیادی در نرخ نفوذپذیری می‌شود

نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که مقدار شماره منحنی (CN) بیشترین نقش را در پراکندگی و عدم قطعیت خروجی ایفا می‌کند. (Ebrahimi et al., 2020) نیز با به‌کارگیری روش آلفا-کات، عدم قطعیت مدل کوستیاکوف را در سطوح مختلف فشردگی خاک تحلیل کردند و دریافتند که این مدل در خاک‌های فشرده دقت پایین‌تری دارد. همچنین، Rahman et al. (2021) از مدل شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین نفوذ تجمعی در خاک‌های مختلف استفاده کرده و نتایج آن را با مدل‌های تجربی مقایسه نمودند؛ یافته‌های آن‌ها برتری، دقت و پایداری بهتر شبکه عصبی را در مواجهه با نویز داده‌ها نشان داد (Karimi and Delavar, 2022). با مقایسه روابط مختلف نفوذ در محیط‌های نیمه‌خشک به این نتیجه رسیدند که مدل SCS-CN در شرایط بارندگی شدید عملکرد بهتری دارد، اما در بارش‌های کم، مدل گرین-آمپت ترجیح داده می‌شود. در نهایت، Lopez et al., (2024) در پژوهشی جامع با استفاده از داده‌های سنجش از دور و مدل‌سازی فازی، به تحلیل عدم قطعیت مدل SCS در سطح حوضه پرداختند و نشان دادند که تلفیق روش فازی با مدل‌های سنتی می‌تواند موجب کاهش خطا و افزایش اطمینان‌پذیری نتایج شود. علاوه بر این، راهبر و همکاران (۱۳۹۹) از رویکردهای فازی برای برآورد پارامترهای هیدرودینامیکی و کاهش عدم قطعیت داده‌ها بهره گرفتند.

علی‌رغم انجام تحقیقات گسترده جهت مقایسه مدل‌های مختلف برآورد نفوذ، تحلیل عدم قطعیت این مدل‌ها به‌منظور ارزیابی حساسیت و پایداری نتایج آن‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، در تحقیق حاضر تلاش شده است تا علاوه بر بررسی دقت مدل‌های کلاسیک، یک مدل شبکه عصبی مصنوعی نیز توسعه یافته و میزان پایداری و عدم قطعیت آن با استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی و تحلیل عدم قطعیت پارامترهای ورودی و خروجی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت کوهدشت یکی از بخش‌های شهرستان کوهدشت، واقع در استان لرستان است که بین طول‌های ۴۷° ۵۲' تا ۴۷° ۵۲' شرقی و عرض‌های ۳۳° ۱۷' تا ۳۱° ۴۱' شمالی واقع شده است، دشت کوهدشت با مساحتی حدود ۴۵۶ کیلومترمربع در ۹۰ کیلومتری غرب خرم‌آباد، یکی از قطب‌های مهم کشاورزی

مدل فیلپ را در استان چهارمحال و بختیاری بررسی کردند؛ نتایج آن‌ها نشان داد که در مراتع تخریب‌نشده، پارامترهای نفوذ دارای ساختار مکانی قوی هستند. ملکی و همکاران (۱۳۹۲) نیز در ارزیابی مدل‌های مختلف برای اراضی نیشکر جنوب اهواز، مدل سازمان حفاظت خاک (SCS) را با کمترین خطا (۱۱.۶٪) دارای بیشترین کارایی دانستند. پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از شاخص‌های آماری نظیر RMSE و ضریب تبیین، مدل کوستیاکوف-لوییز را در تمامی شرایط به‌عنوان برترین مدل معرفی کردند. همچنین قوردویی میلان و همکاران کارایی مدل‌های داده محور و شبکه عصبی را در شبیه‌سازی منابع آب زیرزمینی اثبات نمودند (۱۳۹۹). در مطالعات بین‌المللی (Oku et al., 2005) مدل‌های کوستیاکوف و فیلپ را ارزیابی کرد و دریافت که مدل فیلپ در زمین‌های تحت پوشش گیاهی، اراضی تیمار شده با کودهای آلی و خاک‌های لخت، عملکرد بهتری نسبت به کوستیاکوف دارد. جمع‌بندی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که نتایج همواره یکسان نبوده و گاهی ضد و نقیض است که این مسئله از طبیعت متغیر فرآیند نفوذ نشأت می‌گیرد؛ به‌طوری که یک مدل ممکن است در دو خاک مشابه، عملکرد متفاوتی داشته باشد (Sy, 2006). هر یک از مدل‌های نفوذ دارای فرضیات و محدودیت‌های خاصی هستند و عدم انطباق این فرضیات با شرایط واقعی، دقت برآوردها را کاهش می‌دهد (Turner, 2006). با توجه به ضرورت تعیین دقیق نفوذ در مدیریت منابع آب، در این پژوهش ابتدا با استفاده از داده‌های میدانی نفوذسنج استوانه مضاعف، مدل‌های گرین-آمپت، کوستیاکوف، هورتون و SCS مورد ارزیابی قرار گرفتند تا مدل بهینه انتخاب شود. در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی پیرامون تحلیل حساسیت و عدم قطعیت پارامترهای نفوذ انجام شده است. برای نمونه (Zhang et al., 2014) با مقایسه مدل‌های هورتون، SCS و کوستیاکوف در اراضی کشاورزی چین نشان دادند که مدل SCS در تخمین رواناب دچار بیش‌برآورد می‌شود، در حالی که مدل گرین-آمپت در خاک‌های شنی عملکرد دقیق‌تری دارد. در پژوهشی دیگر (Mohammadi et al., 2019) در ایران، به بررسی حساسیت روابط هورتون و گرین-آمپت نسبت به تغییرات رطوبت اولیه خاک پرداختند و نشان دادند که پارامتر نفوذ اولیه گرین-آمپت بیشترین تأثیر را بر نتایج خروجی دارد (Singh and Mishra, 2018). در هند با استفاده از روش مونت کارلو، عدم قطعیت مدل SCS-CN را در برآورد رواناب بررسی کردند؛

انتخاب شد و نمودارهای آهنگ تغییرات سرعت نفوذ نسبت به زمان ترسیم گردید. در ادامه‌ی تحقیق، با استفاده از مدل‌های گرین-آمپت اصلاح‌شده، کوستیاکوف، هورتون، سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) و مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی، ضرایب مربوط به نفوذ محاسبه شد. در نهایت، مدلی که با توجه به معیارهای ارزیابی، بهترین جواب را ارائه داد، به‌عنوان مدل برتر انتخاب شد.

مدل‌های برآورد نفوذ

به‌منظور انتخاب بهترین مدل برآورد نفوذ با توجه به داده‌های موجود، کاربرد عملی و همچنین استفاده‌ی متعدد از پنج مدل نفوذ گرین-آمپت، کوستیاکوف، هورتون، سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) و ANN انتخاب گردیدند. در زیر خلاصه‌ای از مدل‌های استفاده‌شده در این پژوهش ارائه می‌گردد.

مدل گرین آمپت

Green and Ampt (1911) یکی از اولین معادله‌های نفوذ را برای شرایط بارندگی یکنواخت ارائه داد (علیزاده، ۱۳۸۵). اساس این رابطه از معادله ریچاردز گرفته شده است که به‌صورت رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود.

$$I = K(H_o + S_w + L)/L \quad (1)$$

در این رابطه K ضریب هدایت هیدرولیکی خاک، H_o ارتفاع آب انباشته شده در سطح خاک، پتانسیل ماتریک خاک در جبهه رطوبتی، فاصله سطح خاک تا جبهه رطوبتی و شدت نفوذ می‌باشد. به‌دلیل اینکه مدل گرین-آمپت قادر نبود طی آزمایش‌هایی پدیده نفوذ را به درستی در خاک‌های غیر همگن شبیه سازی کند، و بالا بودن ریشه‌ی میانگین مربعات، این مدل بعداً در سال ۱۹۸۰ توسط Alfara و Hachum به صورت رابطه‌ی ۲ اصلاح شد و مدل اصلاح شده‌ی گرین-آمپت را برای تعیین نفوذ در خاک‌هایی با لایه‌بندی مختلف به‌کار بردند.

$$I = \frac{A}{i} + B \quad (2)$$

در این معادله I سرعت نفوذ، i نفوذ تجمعی و A و B ضرایبی هستند که از روی آزمایش نفوذ به دست می‌آیند. رابطه‌ی گرین-آمپت خیلی ساده است و پارامترهای آن را می‌توان به سادگی از روی خصوصیات فیزیکی خاک به‌دست آورد.

مدل کوستیاکوف

استان لرستان محسوب می‌شود. این منطقه برای تأمین آب مورد نیاز خود، کاملاً به منابع آب زیرزمینی متکی است و دارای اقلیم مدیترانه‌ای با تابستان خشک و زمستان‌های مرطوب است؛ متوسط بارندگی سالانه آن ۷۳۹۸ میلی‌متر گزارش شده است (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۳؛ صفوی، ۱۳۸۵). با توجه به وضعیت بحرانی سطح آب زیرزمینی این دشت، مدل‌سازی به‌هنگام آب زیرزمینی آن و بررسی اثر باران بر نفوذ در خاک از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین، بررسی نفوذپذیری خاک این منطقه می‌تواند باعث افزایش بصیرت مهندسی در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی شود.

آزمایش نفوذ سنجی (استوانه مضاعف)

در این تحقیق به‌منظور برداشت داده‌های مشاهداتی نفوذ، به‌صورت تصادفی ۶ نقطه از مناطق مختلف دشت که پراکنش نسبتاً خوبی در سطح حوزه داشتند، انتخاب گردید، در این نقاط، آزمایش نفوذسنجی به‌وسیله‌ی روش استوانه‌ی مضاعف و همچنین برداشت نمونه‌ی خاک از عمق ۰ تا ۴۰ سانتی‌متر سطحی انجام پذیرفت. بافت خاک در مناطق مورد مطالعه لومی، لومی‌شنی، لومی‌سیلتی و درصد کمی لومی‌رسی است و دلیل این نوع بافت‌ها، آبرفتی بودن دشت است؛ از نظر ساختمان خاک، به‌طور معمول ساختمانی کروی متوسط و ریز در این منطقه وجود دارد. شکل پراکنش نقاط آزمایش نفوذسنجی و برداشت نمونه‌ی خاک در حوزه را نشان می‌دهد. روش نمونه‌برداری تصادفی برای تعیین محل‌های اندازه‌گیری نفوذ مدنظر قرار گرفت. انتخاب محل‌های نمونه‌برداری به این ترتیب بود که نقاط نمونه‌برداری ابتدا بر روی نقشه به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. سپس با توجه به اینکه ممکن بود نقاط انتخاب‌شده دارای شبیه‌ی باشند که مناسب اندازه‌گیری نفوذ نباشند، لذا با پیمایش صحرایی و دید کارشناسی در منطقه، نقاطی با شیب مناسب انتخاب شدند. بعد از مشخص شدن محل‌های نمونه‌برداری، از استوانه‌های مضاعف به‌دلیل معمول بودن شیوه و تأمین اطلاعات مفید، در صورت کاربرد صحیح، جهت اندازه‌گیری نفوذ استفاده شد. در این آزمایش‌ها برداشت میزان نفوذ تا زمان رسیدن به سرعت نفوذ نهایی، هنگامی که آهنگ کاهش سرعت نفوذ طی یک ساعت به کمتر از ۳۰ درصد برسد، ادامه پیدا کرد. نتایج حاصل از تحقیق به دو صورت ترسیم نمودار و مقایسه بین مقادیر واقعی و تخمین حاصل از مدل‌های مختلف نفوذ ارائه گردید و یک پایه‌ی زمانی مشترک برای تمامی اندازه‌گیری‌ها لحاظ گردید. بدین ترتیب پایه‌ی زمانی ۶۰ دقیقه با توجه به مدت‌زمان ثابت شدن سرعت نفوذ

جدول ۱- مدل های نفوذ مورد استفاده و ضرایب آن ها.

Table 1- Infiltration models used and their coefficients

Model Name	Model coefficients	Infiltration equation
Green-Ampt	$I = A/i + B$	a, b
Kostiakov	$I = Kt^b$	k, b
Horton	$f_t = f_c + (f_o - f_c)e^{-(kt)}$	k
(SCS)	$i(t) = at^b + c$	a, b
ANN	-	-

مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

در این مرحله، به منظور مدل سازی غیرخطی پارامتر نفوذ، از شبکه عصبی پرسپترون استفاده شد. این مدل، یک شبکه عصبی پیشخور است که از چندین لایه و نورون تشکیل شده و ساختار اصلی آن به شرح زیر است:

لایه ورودی: تعداد نورون های این لایه برابر با تعداد پارامترهای ورودی بوده که شامل سه مورد است: شدت نفوذ نهایی (زمانی که نفوذ به ثبات نسبی رسیده باشد) بر حسب میلی متر بر ساعت، شدت نفوذ اولیه بر حسب میلی متر بر ساعت و زمان از شروع آزمایش بر حسب دقیقه.

لایه های پنهان: این لایه ها بین لایه های ورودی و خروجی قرار می گیرند و وظیفه استخراج و یادگیری ویژگی های پیچیده و غیرخطی داده ها را بر عهده دارند. یک شبکه می تواند شامل یک یا چند لایه پنهان باشد. هر نورون در یک لایه به تمام نورون های لایه قبلی متصل است.

لایه خروجی: برای مسائل رگرسیون، این لایه معمولاً تنها یک نورون دارد که در این پژوهش، مقدار پیش بینی شده برای نفوذ در زمان t را تولید می کند. در لایه خروجی معمولاً از تابع فعال سازی خطی استفاده می شود تا خروجی بتواند هر مقداری را به خود بگیرد.

عملکرد شبکه عصبی بر پایه اعمال تبدیل های خطی و غیرخطی از طریق توابع فعال سازی بر روی ورودی های هر لایه استوار است. این ساختار امکان مدل سازی روابط بسیار پیچیده و غیرخطی بین ویژگی های ورودی و خروجی را فراهم می آورد. مرحله بعدی بهینه سازی هاینر پارامترهاست؛ هاینر پارامترها پارامترهایی هستند که قبل از فرآیند آموزش مدل، توسط مهندس یادگیری ماشین تنظیم شده و مستقیماً بر نحوه یادگیری و عملکرد مدل تأثیر می گذارند. یافتن بهترین ترکیب از هاینر پارامترها برای یک مدل خاص و مجموعه داده مشخص، اغلب فرآیندی تجربی و زمان بر است. در این پژوهش، از

کوستیاکوف در سال ۱۹۳۲ رابطه ی تجربی (۳) را برای تعیین مقدار نفوذ تجمعی پیشنهاد کرد. اگر از این رابطه مشتق گرفته شود به صورت رابطه ۴ بیان می گردد و برای محاسبه نفوذ لحظه ای مورد استفاده قرار می گیرد (Dingman, 2008).

$$i(t) = ct^{-a} \quad (3)$$

در این روابط a و c ضرایب مختلفی برای خاک های مختلف بوده و مقدار a و c به ترتیب بزرگتر از صفر و بین صفر تا یک می باشد و به روش تجربی تعیین می شوند، t زمان و i میزان نفوذ در زمان t و I_0 نفوذ تجمعی است (علیزاده، ۱۳۸۵).

مدل هورتون

ساده ترین و کاربردی ترین معادله نفوذ، معادله هورتون می باشد. هورتون در سال ۱۹۴۰ پس از مشاهده های 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 می یابد، به طوری که در ابتدای بارندگی ظرفیت آن حداکثر و در نهایت به مقدار ثابت می رسد. معادله هورتون به صورت رابطه ۴ بیان میگردد.

$$f_t = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt} \quad (4)$$

در این رابطه نفوذ در زمان از شروع بارندگی بر حسب میلیمتر بر ساعت، شدت نفوذ نهایی بر حسب میلیمتر بر ساعت (وقتی که نفوذ نسبتاً ثابت شده باشد)، شدت نفوذ اولیه بر حسب میلیمتر بر ساعت و زمان از شروع بارندگی بر حسب ساعت و ثابت هورتون است که بستگی به کاربری اراضی و جنس خاک دارد.

مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS)

در سال ۱۹۸۹ کارشناسان سازمان حفاظت خاک آمریکا معادله ساده ای برای تعیین مقدار نفوذ تجمعی آب به داخل خاک ارائه نمودند، که نهایتاً منجر به روشی در محاسبه نفوذ گردید و به مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا معروف شد و به صورت رابطه ۵ ارائه گردید.

$$i(t) = at^b + c \quad (5)$$

در این رابطه، i مقدار نفوذ تجمعی از زمان شروع نفوذ (سانتیمتر)، c عدد ثابت و برابر ۰/۶۹۸۵، t زمان از لحظه شروع نفوذ (دقیقه) و ضرایب a و b تابعی از شماره منحنی نفوذ بوده که از جدول استاندارد SCS استخراج می گردد (نشاط و همکاران، ۱۳۸۶).

یک الگوریتم بهینه‌سازی تطبیقی است که معمولاً عملکرد خوبی در طیف وسیعی از مسائل دارد و به‌طور مؤثر نرخ یادگیری را برای هر پارامتر تنظیم می‌کند. انتخاب 'dama' به‌عنوان بهترین حل‌گر، نشان‌دهنده کارایی بالای آن در این مسئله خاص است.

با استفاده از GridSearchCV، تمامی ترکیب‌های ممکن از مقادیر تعریف‌شده برای این هایپرپارامترها بررسی شده و بهترین مجموعه پارامترها که منجر به کمترین خطا یا بالاترین امتیاز R^2 روی داده‌های اعتبارسنجی متقابل می‌شد، انتخاب گردید.

به‌طور خلاصه بهترین هایپرپارامترهای تعیین‌شده به شرح زیر است:

- تابع فعال‌سازی: تانژانت هیپربولیک
- تعداد لایه‌های پنهان: ۱ لایه
- تعداد نوروهای هر لایه: ۱۰
- حداکثر تکرار: ۱۵۰۰
- حل‌گر: Adam

این پیکربندی، هسته مدل شبکه عصبی پرسپترون را تشکیل می‌دهد که برای پیش‌بینی نفوذ در زمان مورد استفاده قرار گرفت.

شاخص‌های ارزیابی

دقت روابط نفوذ مختلف در تخمین مشخصات نفوذ آب در خاک از مقایسه عمق آب نفوذی محاسبه شده از رابطه‌های نفوذ و عمق آب نفوذی مشاهده‌ای و به‌طور معمول با استفاده از ضریب تبیین که نزدیک به یک باشد، و خطای نسبی و ریشه میانگین مربعات خطا که در مدلی نزدیک به صفر باشند، بهترین مدل تعیین می‌گردد (رابطه ۶ و ۷)؛ محققین بسیاری از جمله Elliot and Eisenhower, McClymont and Smith, Hanson et al., برومندنسب و همکاران، عباسی و همکاران، و شاهسواری و همکاران برای ارزیابی نتایج حاصل از مطالعات خود از این روابط استفاده کرده‌اند (ملکی و همکاران، ۱۳۸۳).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_0 - \bar{y}_0)(y_{22} - \bar{y}_{22})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_0 - \bar{y}_0)^2 \sum_{i=1}^n (y_{22} - \bar{y}_{22})^2}} \right]^2 \quad (6)$$

$$EF = \left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right) / \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \quad (7)$$

که در آن‌ها: عمق آب نفوذی مشاهده‌ای، عمق آب نفوذی محاسبه‌ای از مدل‌های نفوذ، میانگین مقادیر مشاهده شده و N تعداد داده‌های اندازه‌گیری نفوذ است.

نتایج و بحث

روش GridSearchCV برای بهینه‌سازی هایپرپارامترها استفاده شده است.

GridSearchCV به‌طور سیستماتیک، تمام ترکیب‌های ممکن از مقادیر مشخص‌شده برای هر هایپرپارامتر را آزمایش کرده و با استفاده از اعتبارسنجی متقابل (Cross-Validation) بر روی مجموعه داده آموزش، بهترین ترکیب را بر اساس یک معیار ارزیابی مشخص مانند R^2 یا (MAEMAEMAE) شناسایی می‌نماید.

هایپرپارامترهای کلیدی که در این پژوهش مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفته‌اند، شامل موارد زیر هستند:

تابع فعال‌سازی: این توابع، ویژگی غیرخطی بودن را به مدل اضافه می‌کنند و امکان یادگیری الگوهای پیچیده را فراهم می‌سازند. توابع رایج شامل 'relu'، 'tanh'، 'sigmoid' و 'linear' می‌باشند. در این پژوهش، تانژانت هیپربولیک ('tanh') به‌عنوان بهترین تابع فعال‌سازی انتخاب شده است. تابع tanh خروجی را در محدوده $[-1, 1]$ قرار می‌دهد و به‌دلیل ماهیت سیگموئیدی خود، می‌تواند به‌خوبی برای مدل‌سازی روابط پیچیده مناسب باشد.

اندازه لایه پنهان: این هایپرپارامتر، ساختار معماری لایه‌های پنهان را مشخص می‌کند. این پارامتر به‌صورت یک تاپل یا لیستی از اعداد صحیح تعریف می‌شود که هر عدد، تعداد نوروها در یک لایه پنهان را نشان می‌دهد. در این پژوهش، یک لایه پنهان با ۱۰ نرون به‌عنوان بهترین اندازه تعیین شده است.

نرخ یادگیری: این پارامتر، اندازه گام‌هایی را که در فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از گرادیان کاهشی طی می‌شود، کنترل می‌کند. نرخ یادگیری خیلی زیاد می‌تواند باعث پرش از نقطه بهینه و ناپایداری شود، در حالی که نرخ یادگیری خیلی کم باعث کندی شدید همگرایی می‌گردد؛ لذا باید دقت لازم جهت در نظر گرفتن مقدار این هایپرپارامتر لحاظ شود.

حداکثر تکرار: این پارامتر، حداکثر تعداد دوره‌های آموزشی (Epochs) را که مدل برای همگرا شدن تلاش می‌کند، مشخص می‌کند. اگر مدل در این تعداد تکرار همگرا نشود، فرآیند آموزش متوقف می‌شود. مقدار ۱۵۰۰ نشان‌دهنده این است که مدل برای رسیدن به یک جواب مطلوب به تعداد تکرارهای نسبتاً زیادی نیاز داشته است.

حل‌گر (Solver): حل‌گر الگوریتمی است که برای به‌روزرسانی وزن‌ها در طول فرآیند آموزش استفاده می‌شود. حل‌گرهای رایج شامل 'adam'، 'sgd'، 'lbfgs' و غیره هستند. 'adam'

نتایج بررسی دقت مدل‌ها

نتایج این تحلیل برای سه بازه زمانی ۱، ۲ و ۳ ساعته ارائه شد. بر اساس محاسبات انجام‌شده، روند افزایشی در عدم قطعیت نفوذ تجمعی با افزایش زمان مشاهده شد که صحت این موضوع با نگاهی به معادلات موجود نیز قابل اثبات است. بدین صورت که یکی از ضرایب موجود در معادلات به عنوان زمان (مانند ضریب b در روابط کوستیاکوف و (SCS)) قرار دارد و با افزایش مقدار زمان t در معادلات مذکور، میزان افزایش یا کاهش مقدار کلی عدم قطعیت خروجی با شدت بیشتری رشد می‌کند.

همچنین مقایسه روابط مختلف نشان داد که مدل SCS بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات پارامترها دارد، به‌گونه‌ای که عدم قطعیت آن (با توجه به جدول ۳) به ترتیب برابر ۶۱٪، ۷۰٪ و ۸۸٪ در زمان‌های یک، دو و سه ساعته به‌دست آمد. پس از آن، مدل‌های هورتون (۲۳٪، ۲۶٪، ۳۰٪) و کوستیاکوف (۲۰٪، ۳۰٪، ۳۵٪) بیشترین عدم قطعیت را نشان دادند. مدل گرین-آمپت رفتار پایدارتر و عدم قطعیت کمتری داشت (به‌ترتیب ۱۱٪، ۱۵٪، ۲۱٪)، اما دقت کلی آن نیز نسبت به سایر مدل‌ها پایین‌تر بود. در مقابل، مدل توسعه‌داده‌شده‌ی شبکه عصبی مصنوعی که با داده‌های آزمایشگاهی آموزش داده شده بود، کمترین عدم قطعیت را در تمامی زمان‌ها نشان داد (۷٪، ۱۰٪، ۱۲٪)؛ این موضوع بیانگر مقاومت بیشتر این مدل نسبت به نوسانات ورودی و پایداری بالاتر آن در پیش‌بینی نفوذ می‌باشد.

در مجموع، تحلیل آلفا-کات امکان بررسی اثر نوسانات پارامترها بر خروجی مدل‌ها را فراهم می‌سازد و می‌تواند ابزار مفیدی برای ارزیابی قابلیت اطمینان مدل‌های مختلف در شرایط عدم قطعیت داده‌ها باشد. نتایج این بخش می‌تواند راهنمای مناسبی برای انتخاب مدل در شرایط واقعی و با توجه به سطح ریسک و حساسیت پروژه‌ها فراهم آورد.

جدول ۳- مقادیر عدم قطعیت حاصل با فرض ده درصد عدم

قطعیت برای پارامترهای ورودی در زمان‌های مختلف.

Table 3- Uncertainty values obtained assuming 10% uncertainty for input parameters at different times.

Model Type	Uncertainty at $t=1$	Uncertainty at $t=2$	Uncertainty at $t=3$
Kostiakov	20	25	29
Modified Green-Ampt	26	30	35
Horton	23	26	30
SCS	61	70	88
ANN	7	10	12

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج مندرج در جدول ۲ و محاسبه معیارهای سنجش خطا در مدل‌های نفوذ، مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) دارای ضریب تبیین برابر 0.98 بوده و از درصد خطای نسبی برابر 0.678 و همچنین ریشه میانگین مربعات خطا 0.938 برخوردار است. با توجه به اینکه در مناطقی که آزمایش نفوذ انجام شده، کاربری مرتع و کشاورزی حاکم است، این امر باعث می‌شود که سرعت نفوذپذیری مطلوبی داشته باشیم. بر این اساس، مناسب‌ترین مدلی که بتواند همبستگی بین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده را نشان دهد، مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) است؛ در نتیجه، این مدل به عنوان بهترین مدل انتخاب شد و مدل گرین-آمپت به عنوان مدل دوم انتخاب شد. همچنین مدل‌های کوستیاکوف و هورتون به عنوان ضعیف‌ترین مدل‌ها از نظر دقت شناسایی شدند.

جدول ۲- معیارهای سنجش خطا برای هر یک از مدل‌ها.

Table 2- Error evaluation metrics for each of the models.

Model Type	R2	RMSE	RE (%)
Kostiakov	0/874	2/74	-0/851
Modified Green-Ampt	0/8	10/358	-26/3
Horton	0/792	11/137	-4/11
SCS	0/988	0/938	0/678
ANN	0/94	0/86	0/5

بررسی تحلیل عدم قطعیت روابط نفوذ با استفاده از روش آلفا-کات

با توجه به اهمیت درک رفتار نفوذ آب در خاک و تأثیرپذیری آن از تغییرات پارامترهای مدل، در این پژوهش از روش آلفا-کات به‌منظور تحلیل عدم قطعیت پنج مدل مذکور در جدول (۲) استفاده شد. در این روش، با تغییر پارامترهای هر رابطه در بازه $\pm 10\%$ دامنه تغییرات نفوذ تجمعی محاسبه و میزان عدم قطعیت نسبی در زمان‌های مختلف برآورد گردید؛ بدین صورت که در هر رابطه، ابتدا افزایشی یا کاهشی بودن یک پارامتر ورودی بر پارامتر خروجی (نفوذ تجمعی) تشخیص داده شده و سپس با اعمال مقادیر حدی (مقدار اولیه پارامتر به‌علاوه یا منهای ۱۰ درصد آن)، مقادیر حدی پارامتر خروجی محاسبه گردید. به عنوان مثال، در رابطه هورتون، با توجه به فرمول آن، افزایش پارامترهای ورودی f_0 و f_c تأثیر افزایشدهنده و پارامتر k تأثیر کاهشدهنده دارد (که این موضوع با توجه به موقعیت و علامت پارامترها در فرمول قابل اثبات است).

غیراشباع و تأثیر تغییر کاربری اراضی بر آن‌ها، شهرستان کامیاران، استان کردستان. فصلنامه بین‌المللی پژوهشی-تحلیلی منابع آب و توسعه، ۲(۵).

پرچمی عراقی، ف.، میرلطیفی، س.م.، قربانی‌دشتکی، ش.، مهدیان، م.ح.، ۱۳۸۹. برآورد نفوذ تجمعی آب به خاک با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در خاک‌های آهکی. نشریه آب و خاک، ۲۴(۳): ۵۱۲-۵۲۶.

راهبر، ا.، تلخابی، م.، نخعی، م.، ۱۳۹۹. کاربرد رگرسیون حداقل مربعات فازی اصلاح‌شده در برآورد پارامترهای هیدرودینامیکی سفره محبوس با روش کوپر-ژاکوب (مطالعه موردی: دشت سوهان). هیدروژئولوژی، ۵(۱): ۱۱-۱۱۷.

سپهوند، ع.، طایی‌سمیرمی، م.، میرنیا، س.خ.، مرادی، ح.ر.، ۱۳۹۰. ارزیابی حساسیت مدل‌های نفوذ نسبت به تغییرپذیری رطوبت خاک. نشریه آب و خاک، ۲۵(۲): ۱-۱۱.

صاغی جدید، م.، نادری، م.، ندیری، ع.، ۱۴۰۳. ارزیابی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و شناسایی دشت‌های ممنوعه (مطالعه موردی: استان یزد). هیدروژئولوژی، ۹(۱): ۱۲۱-۱۳۶.

صفوی، ح.ر.، ۱۳۸۵. هیدرولوژی مهندسی. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ۶۰۳ ص.

علیزاده، ا.، ۱۳۸۵. اصول هیدرولوژی کاربردی. چاپ بیست‌وسوم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ۸۰۸ ص.

قربانی‌دشتکی، ش.، همایی، م.، مهدیان، م.ح. تأثیر کاربری اراضی بر تغییرات مکانی پارامترهای نفوذ آب به خاک. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۹(۲): ۲۰۹-۲۲۱.

کلاتتری، م.، صادقی‌اقدام، ف.، کاکي، م.، اسدزاده، ف.، بایزیدی، م.، ۱۴۰۳. بررسی آسیب‌پذیری سفره آب زیرزمینی دشت دهگلان با روش‌های مختلف بر مبنای تغییرات پوشش گیاهی. هیدروژئولوژی، ۹(۱): ۱۴۷-۱۶۳.

محمدی، م.ح.، رفاهی، ح.، ۱۳۸۴. تخمین پارامترهای معادلات نفوذ به‌وسیله ویژگی‌های فیزیکی خاک. مجله علوم کشاورزی ایران، ۳۶(۶): ۱۳۹۱-۱۳۹۸.

محمدی‌کنگرانی، ح.، خلیلی‌زاده، م.، حلی‌ساز، ا.، ۱۳۹۰. بررسی ارتباط میان تغییر کاربری اراضی و نرخ نفوذپذیری

ارزیابی و مقایسه مدل‌های نفوذ گرین-آمیت، کوستیاکوف، هورتون و سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) نشان داد که علی‌رغم برخورداری مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) از بهترین مقادیر شاخص‌های ارزیابی (شامل ضریب تبیین، درصد خطای نسبی و میانگین مربعات خطا)، این مدل کمترین میزان اطمینان (بیشترین عدم قطعیت) را دارد. در مرتبه بعدی، مدل شبکه عصبی از نظر دقت در جایگاه دوم بوده و اطمینان‌پذیری آن از سایر مدل‌ها بیشتر است (کمترین میزان عدم قطعیت را دارد). برتری دقت SCS با پژوهش‌های نشاط و همکاران (۱۳۸۶) مطابقت دارد که مدل SCS را برای دوره‌های بلندمدت مناسب و مدل کوستیاکوف را برای دوره‌های کوتاه‌مدت مناسب دانسته‌اند و مدل‌های گرین-آمیت و هورتون در رتبه آخر قرار دارند. همچنین، نتایج پژوهش‌های ملکی و همکاران (۱۳۸۳) که گزارش نمودند مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) نسبت به مدل کوستیاکوف برازش بهتری با داده‌های تجربی دارد، با نتیجه این تحقیق همخوانی دارد. از دلایل تفاوت در معرفی بهترین مدل با مقالات مشابه می‌توان به تفاوت در شیوه اندازه‌گیری نفوذ، تفاوت در بافت خاک‌ها، مقدار رطوبت اولیه خاک و استفاده از معیارها و شاخص‌های آماری متفاوت اشاره کرد. برای بررسی عدم قطعیت مدل‌ها، روش فازی آلفا-کات (α -cut) به کار رفت. نتایج نشان داد مدل شبکه عصبی کمترین عدم قطعیت (۱۱٪ تا ۲۱٪) و مدل SCS بیشترین عدم قطعیت (۶۱٪ تا ۸۸٪) را در برآورد نفوذ تجمعی دارد. نتایج تحلیل عدم قطعیت نشان می‌دهد که گرچه مدلی مانند SCS دقت بالاتری داشته است، اما مدلی ناپایدارتر و حساس‌تر به پارامترهای ورودی بوده است. این نتیجه می‌تواند به عنوان یک دستاورد کلی مدنظر قرار گیرد که برای مقایسه مدل‌های مهندسی، علاوه بر دقت آماری مدل، ضروری است تحلیل عدم قطعیت و میزان اطمینان مدل نیز مورد بررسی قرار گیرد؛ به عنوان مثال در این تحقیق ممکن بود بدون تحلیل عدم قطعیت، روش SCS برای استفاده در اولویت باشد، اما با توجه به دقت و اطمینان‌پذیری شبکه عصبی توسعه‌یافته، این مدل می‌تواند در اولویت استفاده قرار گیرد. همچنین این یافته‌ها برتری مدل‌های داده‌محور را در مدیریت بهینه منابع آب تأیید می‌کند.

منابع

ابراهیمی، ف.، رئوف، م.، اصغری، ا.، حسینی، ی.، ۱۳۹۳. تحلیل پارامتریک معادلات نفوذ در شرایط اشباع و

- Loaiciga, H.A., Huang, A., 2007. Ponding analysis with Green-Ampt infiltration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(1): 109–112.
- Lopez, J.A., Martinez, R., Vega, M., 2024. Hybrid fuzzy-SCS modeling for uncertainty assessment in watershed infiltration studies. *Journal of Hydrologic Engineering*, 29(3): 04023085.
- Mohammadi, K., Ghanbarian, G., Araghejad, S., 2019. Sensitivity analysis of Horton and Green-Ampt models to initial soil moisture variations. *Irrigation Science*, 37(2): 123–132.
- Mudiare, O.J., Adewunmi, J.K., 2000. Estimation of infiltration from field measured sorptivity values. *Nigerian Journal of Soil Science Research*, 1: 1–3.
- Mukheibir, P., 2008. Water resources management strategies for adaptation to climate-induced impacts in South Africa. *Water Resources Management*, 22: 1259–1276.
- Oku, E.E., Essoka, A.N., Oshunsanya, S.I., 2005. Determination of infiltration characteristics and suitability of Kostiakov and Philip infiltration models in predicting infiltration into soils under different treatments. *Global Journal of Pure and Applied Sciences*, 11(3): 323–326.
- Philip, J.R., 1957. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Science*, 84: 257–264.
- Rahman, M.A., Chowdhury, S., Rana, M., 2021. Prediction of soil cumulative infiltration using artificial neural networks and comparison with traditional models. *Environmental Modelling & Software*, 145: 105191.
- Rockström, J., Falkenmark, M., Allan, T., Folke, C., Gordon, L., Jägerskog, A., Kumm, M., Lannerstad, M., Meybeck, M., Molden, D., Postel, S., Savenije, H.H.G., Svedin, U., Turton, A., Varis, O., 2014. *Water Resilience for Human Prosperity*. Cambridge University Press, New York.
- Rost, S., Gerten, D., Bondeau, A., Lucht, W., Rohwer, J., Schaphoff, S., 2008. Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. *Water Resources Research*, 44(9): W09405.
- Singh, R., Mishra, S.K., 2020. Uncertainty analysis of SCS-CN method using Monte Carlo simulation. *Water Resources Management*, 34(9): 2715–2728.
- Sy, N.L., 2006. Modelling the infiltration process with a multi-layer perceptron artificial neural network. *Hydrological Sciences Journal*, 51(1): 3–20.
- Turner, E.R., 2006. Comparison of infiltration equations and their field validation with rainfall simulation. M.Sc. thesis, University of Maryland, USA, 202 p.
- Wang, X.P., Cui, Y., Pan, Y.X., Li, X.R., Yu, Z., Young, M.H., 2008. Effects of rainfall characteristics on infiltration and redistribution خاک و تأثیر آن بر وقوع سیل در حوزه آبخیز جنگلی نکارود. فصلنامه جغرافیای طبیعی، ۴(۱۱).
- ملکی، ع.، بهزاد، م.، برومندنسب، م.، ۱۳۸۳. تعیین ضرایب معادله‌های نفوذ و ارزیابی آن‌ها در اراضی نیشکر جنوب اهواز، واحد ۳۱ امیرکبیر. مهندسی علوم آب (ویژه‌نامه کشاورزی).
- نشاط، ع.، پاره‌کار، م.، ۱۳۸۶. مقایسه روش‌های تعیین سرعت نفوذ عمودی آب در خاک. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۴(۳): ۱–۱۰.

Reference

- Brouwer, C., Prins, K., Kay, M., Heibloem, M., 1988. *Irrigation Water Management: Irrigation Methods. Training Manual No. 5, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.*
- Chahinian, N., Moussa, R., Andrieux, P., Voltz, M., 2005. Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. *Journal of Hydrology*, 306: 191–214.
- Cho, S.E., 2009. Infiltration analysis to evaluate the surficial stability of two-layered slopes considering rainfall characteristics. *Engineering Geology*, 105: 32–43.
- Crescimanno, G., De Santis, A.D., Provenzano, G., 2007. Soil structure and bypass flow processes in a Vertisol under sprinkler and drip irrigation. *Geoderma*, 138: 110–118.
- Delleur, J.W., 2007. *The Handbook of Groundwater Engineering*. Second Edition, CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton, 1342 p.
- Dingman, S.L., 2008. *Physical Hydrology*. Second Edition, Waveland Press, Long Grove, Illinois.
- Ebrahimi, H., Zare, M., Khorshidi, M., 2020. Application of alpha-cut method for uncertainty quantification in infiltration models. *Soil and Tillage Research*, 199: 104589.
- Green, W.H., Ampt, G.A., 1911. Studies on soil physics, part I: The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, 4: 1–24.
- John, J.M., Nosa, A.E., 2009. Soil grouping of the Federal University of Technology, Minna main campus farm using infiltration rate. *AU Journal of Technology*, 13(1): 19–28.
- Johnson, A., 1963. *A Field Method for the Measurement of Infiltration*. US Government Printing Office, Washington, DC.
- Jones, J., 2014. *Global Hydrology: Processes, Resources and Environmental Management*. Routledge, London.
- Karimi, A., Delavar, M., 2022. Evaluating infiltration models under semi-arid climate conditions. *Arabian Journal of Geosciences*, 15: 837.

patterns in revegetation-stabilized desert ecosystems. *Journal of Hydrology*, 358: 134–143.

Zhang, Y., Li, M., Chen, L., 2018. Comparison of infiltration models for agricultural soils in Eastern China. *Journal of Hydrology*, 561: 203–215.