



Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
**Water and Soil
Resources Conservation
(WSRCJ)**

Web site:

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

**Vol. 15
No. 2 (58)**

Received:
2025-01-19

Accepted:
2025-09-15

Pages: 57-68

Performance Evaluation of Infiltration Equations with an Emphasis on the Effect of Reclamation Measures in Paired Watersheds of Gonbad

Saeedreza Moazeni Noghondar¹, Ali Salajegheh^{*2}, Shahram Khalighi Sigaroudi³
and Ali Golkarian⁴

- 1) Ph.D. student, Department of reclamation of Arid and Mountainous Region, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran.
- 2) Professor of the Department of reclamation of Arid and Mountainous Region, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran.
- 3) Associate Professor, Department of reclamation of Arid and Mountainous Region, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran.
- 4) Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

*Corresponding author emails: salajegh@ut.ac.ir

Abstract:

Background and Objectives: Modeling cumulative infiltration and instantaneous infiltration rate of water into the soil is a critical tool for water resource management and watershed project planning, especially in arid and semi-arid regions. These regions face significant challenges such as limited water resources and soil erosion, which hinder sustainable natural resource management. This study aims to evaluate the performance of Horton, Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Philip, and SCS infiltration models in simulating cumulative infiltration and instantaneous infiltration rate in two paired watersheds (restored and control) in the Gonbad area of Hamedan Province, Iran.

Methods: Experimental data were collected using the double-ring infiltrometer method from the northern and southern slopes of the restored and control watersheds. Sampling was conducted more than 10 days after the last rainfall to eliminate the effect of antecedent soil moisture. Statistical criteria, including the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), were employed to evaluate model performance. Simulations were carried out for a 120-minute timeframe, and the obtained data were compared with infiltration models for each slope.

Results: The results indicated that Horton and SCS models outperformed other models due to their flexibility and high accuracy in matching observed data. The highest cumulative infiltration was recorded in the northern slope of the restored watershed, with an observed value of 108.55 mm. The Horton (108.73 mm) and SCS (107.58 mm) models demonstrated excellent agreement with observed data. In the southern slope of the restored watershed, cumulative infiltration was observed to be 65.33 mm, with Horton and SCS models showing the closest predictions. For the northern slope of the control watershed, cumulative infiltration was observed at 50.66 mm, with Horton (50.97 mm) and SCS (52.35 mm) models providing the most accurate estimates. The lowest cumulative infiltration was recorded on the southern slope of the control watershed (33.11 mm).

Analysis of instantaneous infiltration rates yielded similar results. In the northern slope of the restored watershed, the infiltration rate decreased from 293.33 mm/h in the first minute to 35.33 mm/h in the 120th minute. Horton and SCS models showed the best performance in this slope. Southern slopes of both watersheds exhibited lower instantaneous infiltration rates compared to northern slopes, attributed to differences in microclimatic conditions and soil moisture retention capacity.

Conclusion: This study demonstrated that restoration efforts, such as improving vegetation cover and managing grazing, significantly enhance soil infiltration capacity. The restored watershed, particularly its northern slope, exhibited higher cumulative infiltration and instantaneous infiltration rates compared to the control watershed. Furthermore, Horton and SCS models were identified as the most suitable models for these conditions due to their accuracy and flexibility in simulating infiltration processes. Future studies are recommended to investigate the effects of seasonal variations, soil physical and chemical properties, and climatic influences on infiltration models performance.

Keywords: Cumulative infiltration, Instantaneous infiltration rate, Infiltration models, Water resource management, Paired watersheds



شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:

<https://wsrj.srbiau.ac.ir>

پست الکترونیک:

iauwsrj@srbiau.ac.ir
iauwsrj@gmail.com

سال پانزدهم

شماره ۲ (۵۸)

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۰/۳۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۶/۲۴

صفحات: ۵۷-۶۸

ارزیابی و تحلیل کارایی معادلات نفوذپذیری تحت تأثیر اقدامات احیایی در حوضه زوجی گنبد همدان

سعیدرضا مؤذنی نقندر^۱، علی سلاجقه^{۲*}، شهرام خلیقی سیگارودی^۳ و علی گل‌کاربان^۴

(۱) دانشجوی دکتری گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.

(۲) استاد گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.

(۳) دانشیار گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.

(۴) دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: salajegh@ut.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: مدل‌سازی نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ لحظه‌ای آب در خاک به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در مدیریت منابع آب و طراحی پروژه‌های آبخیزداری، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مناطق، محدودیت منابع آبی و فرسایش خاک از چالش‌های اصلی مدیریت پایدار منابع طبیعی به شمار می‌رود. این مطالعه با هدف ارزیابی عملکرد مدل‌های نفوذ هورتون، کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوئیس، فیلپ و SCS در شبیه‌سازی فرآیند نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ لحظه‌ای آب در دو حوضه احیا شده و شاهد در منطقه گنبد همدان انجام شده است.

روش پژوهش: داده‌های آزمایشی از طریق روش استوانه مضاعف از دامنه‌های شمالی و جنوبی دو حوضه احیا شده و شاهد جمع‌آوری شدند. نمونه‌برداری در بازه زمانی بیش از ۱۰ روز پس از آخرین بارندگی صورت گرفت تا اثرات رطوبت اولیه پیشین از بین برود. به‌منظور ارزیابی مدل‌ها، معیارهای آماری شامل ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE) و ضریب نش-ساتکلیف (NSE) مورد استفاده قرار گرفتند. شبیه‌سازی‌ها در بازه زمانی ۱۲۰ دقیقه انجام شد و داده‌های به‌دست‌آمده برای هر دامنه با مدل‌های نفوذ مقایسه شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مدل‌های هورتون و SCS به دلیل انعطاف‌پذیری و تطابق بالا با داده‌های مشاهداتی، عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشتند. در دامنه شمالی حوضه احیا شده، بیشترین نفوذ تجمعی با مقدار ۱۰۸/۵۵ میلی‌متر ثبت شد. مدل هورتون و SCS با مقادیر ۱۰۸/۷۳ و ۱۰۷/۵۸ میلی‌متر تطابق بالایی با داده‌های مشاهداتی داشتند. در دامنه جنوبی حوضه احیا شده مقدار مشاهداتی نفوذ تجمعی ۶۵/۳۳ میلی‌متر ثبت شد و مدل‌های هورتون و SCS بهترین تطابق را نشان دادند. در حوضه شاهد، دامنه شمالی نفوذ تجمعی مشاهداتی برابر با ۵۰/۶۶ میلی‌متر داشت و مدل‌های هورتون (۵۰/۹۷ میلی‌متر) و SCS (۵۲/۳۵ میلی‌متر) نزدیک‌ترین پیش‌بینی‌ها را ارائه کردند. کمترین نفوذ تجمعی در دامنه جنوبی حوضه شاهد با مقدار مشاهداتی ۳۲/۱۱ میلی‌متر به‌دست آمد.

تحلیل سرعت نفوذ لحظه‌ای نیز نتایج مشابهی ارائه داد. در دامنه شمالی حوضه احیا شده، سرعت نفوذ از ۲۹۳/۳۳ میلی‌متر بر ساعت در دقیقه اول به ۳۵/۳۳ میلی‌متر بر ساعت در دقیقه ۱۲۰ کاهش یافت. مدل‌های هورتون و SCS در این دامنه بهترین عملکرد را داشتند. دامنه‌های جنوبی هر دو حوضه سرعت نفوذ لحظه‌ای کمتری نسبت به دامنه‌های شمالی داشتند که این امر به شرایط میکروکلیمایی و ظرفیت نگهداری رطوبت مرتبط است.

نتیجه‌گیری: این پژوهش نشان داد که اقدامات احیایی نظیر تقویت پوشش گیاهی و مدیریت چرای دام، تأثیر به‌سزایی در افزایش ظرفیت نفوذپذیری خاک داشته‌اند. حوضه احیا شده، به‌ویژه دامنه شمالی آن، نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ لحظه‌ای بیشتری نسبت به حوضه شاهد ثبت کرد. از سوی دیگر، نتایج نشان داد که مدل‌های هورتون و SCS به دلیل انعطاف‌پذیری و دقت بالا در شبیه‌سازی نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ لحظه‌ای، مناسب‌ترین مدل‌ها برای این شرایط بودند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، اثر تغییرات فصلی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و تأثیرات اقلیمی بر عملکرد مدل‌های نفوذ مورد بررسی قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: حوضه زوجی، سرعت نفوذ لحظه‌ای، مدل‌های نفوذ، مدیریت منابع آب، نفوذ تجمعی

مقدمه

آب به عنوان یکی از منابع اساسی حیات انسان و توسعه پایدار، در سطح جهانی همواره با چالش‌های بزرگی همچون تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌های مکرر، و افزایش فشار تقاضا مواجه بوده است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که حدود ۴۰ درصد سطح کره زمین را شامل می‌شوند، فرآیند نفوذ آب در خاک نقشی کلیدی در تنظیم چرخه هیدرولوژیک ایفا می‌کند. نفوذپذیری خاک نه تنها تعیین‌کننده تغذیه آبخوان‌ها و کاهش رواناب سطحی است، بلکه به‌طور مستقیم با کاهش فرسایش خاک و بهبود بهره‌وری منابع آبی مرتبط است (Sadegh, Zadeh et al., 2007; Xin et al., 2019). در چنین مناطقی، هرگونه کاهش در ظرفیت نفوذ خاک می‌تواند به افزایش خطر سیلاب، کاهش آب زیرزمینی و تخریب اکوسیستم‌ها منجر شود. به همین دلیل، مدل‌سازی نفوذ به عنوان یکی از ابزارهای حیاتی در مدیریت منابع آب و طراحی پروژه‌های آبخیزداری مطرح است (Shin et al., 2019; Yang et al., 2020).

ایران با اقلیم عمدتاً خشک و نیمه‌خشک، همواره در معرض بحران‌های جدی آب و خاک قرار داشته است. متوسط بارندگی سالانه کشور کمتر از یک سوم میانگین جهانی است و توزیع زمانی و مکانی آن بسیار نامنظم می‌باشد. علاوه بر این، چرای بی‌رویه دام، تخریب پوشش گیاهی و تغییر کاربری اراضی، سبب کاهش نفوذپذیری خاک و تشدید فرسایش سطحی شده است. در چنین شرایطی، بررسی فرآیند نفوذ و استفاده از مدل‌های مناسب می‌تواند به بهبود مدیریت منابع آب کمک شایانی کند (Barani et al., 2000; Fazelpour Aghdaei., 2016). مطالعات پیشین در کشور نشان داده‌اند که اقدامات آبخیزداری از جمله کاشت گونه‌های مقاوم، احداث سازه‌های کوچک مهار آب و اصلاح سطح خاک می‌تواند به‌طور چشمگیری رواناب را کاهش و نفوذپذیری را افزایش دهد (Fakhernikche et al., 2021; Rasool et al., 2014).

استان همدان به دلیل شرایط اقلیمی نیمه‌خشک، شیب‌های نسبتاً تند و فشارهای انسانی ناشی از چرای مفرط، یکی از مناطق بحرانی کشور از نظر فرسایش خاک و کاهش کارایی هیدرولوژیکی محسوب می‌شود. حوضه‌های آبخیز این منطقه در دهه‌های گذشته با اجرای پروژه‌های احیایی نظیر کاشت پوشش گیاهی مقاوم، کنترل چرا و حفاظت آب و خاک مورد بازسازی قرار گرفته‌اند. این اقدامات در حوضه‌های احیا شده موجب بهبود شرایط فیزیکی خاک و افزایش ظرفیت نفوذ گردیده است، در حالی که حوضه‌های شاهد همچنان تحت تأثیر مدیریت نامناسب و تخریب شدید خاک هستند. بررسی دقیق نفوذپذیری در چنین شرایطی، ضمن نشان دادن کارایی اقدامات

مدیریتی، می‌تواند راهگشای برنامه‌های آبی برای احیای مناطق مشابه کشور باشد.

مطالعات متعددی در ایران و جهان به ارزیابی معادلات نفوذ و کارایی آن‌ها در شرایط مختلف پرداخته‌اند. برای نمونه، واعظی و همکاران (۱۳۹۸) عملکرد مدل‌های هورتون و کوستیاکوف-لوتیس را در خاک‌های مختلف ارزیابی کرده و گزارش نمودند که مدل هورتون در شرایط رطوبتی متغیر، دقت بالاتری دارد (Vaezi et al., 2019). همچنین، طالبی^۱ و همکاران (۱۳۹۳) در حوضه‌های آبخیز مناطق خشک ایران نشان دادند که مدل کوستیاکوف به عنوان یک مدل ساده و کارآمد در این مناطق قابل استفاده است (Talebi et al., 2014). در مطالعه دیگری، فاضل‌پور عقدائی^۲ و همکاران (۱۳۹۵) کارایی معادلات نفوذ را در اراضی پخش سیلاب بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که انتخاب معادله مناسب می‌تواند در افزایش کارایی طرح‌های تغذیه مصنوعی نقش کلیدی داشته باشد (Fazelpour Aghdaei., 2016).

در سطح جهانی نیز، شین^۳ و همکاران (۲۰۱۹) و یانگ^۴ و همکاران (۲۰۲۰) تأکید کردند که مدل فیلپ به دلیل در نظر گرفتن مکانیسم‌های فیزیکی نظیر مکش مویینگی و نیروی گرانشی، به‌ویژه در مراحل اولیه نفوذ، عملکرد مطلوبی دارد (Shin et al., 2019; Yang et al., 2020). والیانتراس^۵ و همکاران (۲۰۰۹) با اصلاح معادله کوستیاکوف نشان دادند که در نظر گرفتن شرایط مرزی و اولیه می‌تواند به بهبود برازش مدل کمک کند (Valiantzas et al., 2019). رسول^۶ و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی نشان دادند که ترکیب روش‌های داده‌کاوی با معادلات نفوذ، قابلیت بالایی در پیش‌بینی دقیق فرآیند نفوذ دارد (Rasool et al., 2021). پژوهش ایکسین^۷ و همکاران (۲۰۱۹) نیز اثر پوشش بقایای گیاهی بر فرآیند نفوذ را بررسی و تأیید کرد که مدیریت سطح خاک می‌تواند عامل مهمی در افزایش نفوذپذیری باشد (Xin et al., 2019).

در ایران، مطالعاتی مانند موسوی دهموردی و همکاران (۱۳۹۸) نیز با مقایسه مدل‌های نفوذ به کمک داده‌های استوانه مضاعف و نرم‌افزار HYDRUS-1D نشان دادند که مدل هورتون به دلیل بازنمایی بهتر تغییرات زمانی، در اکثر شرایط دقت بیشتری دارد (Mousavi Dehmurdi et al., 2019). کاوسی و همکاران (۱۳۹۲) نیز به کارگیری مدل SCS را در مدیریت حوضه‌های آبخیز مناطق خشک توصیه کردند (Kavousi et al., 2013). مجموعه این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که هیچ مدلی برای تمامی شرایط برتری مطلق ندارد و انتخاب مدل مناسب باید بر اساس ویژگی‌های اقلیمی، خاکی و مدیریتی هر منطقه صورت گیرد.

عمدتاً در ماه‌های آبان تا فروردین رخ می‌دهد. بارش در ماه‌های دی و بهمن به اوج خود می‌رسد که همزمان با فصل زمستان است. رشد پوشش گیاهی معمولاً از اواخر اسفند آغاز شده و تا اواسط تابستان ادامه دارد. متوسط دمای سالانه منطقه ۱۱ درجه سانتی‌گراد است و دما در زمستان به زیر صفر و در تابستان به بیش از ۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

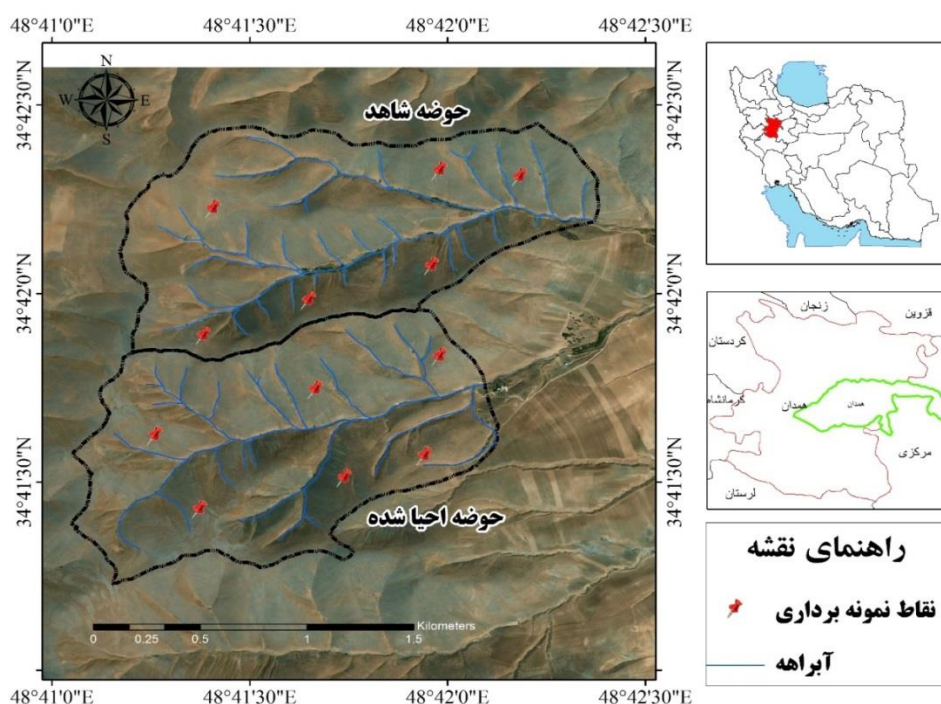
توپوگرافی منطقه شامل اراضی کوهستانی با شیب‌های تند تا متوسط است. میانگین شیب در حوضه احیا شده ۳۲/۷ درصد و در حوضه شاهد ۳۰/۳ درصد است. هر دو حوضه دارای دامنه‌های شمالی و جنوبی هستند که به دلیل تنوع ریزاقلیم‌ها، تأثیرات متفاوتی بر خصوصیات خاک دارند. خاک منطقه عمدتاً از سنگ‌های آذرین و رسوبی هوازده تشکیل شده و بافت خاک از لوم رسی تا لوم شنی متغیر است. احیای پوشش گیاهی در حوضه احیا شده بیش از دو دهه پیش آغاز شد و شامل کاشت گونه‌های مقاوم به خشکی و حفاظت از آب و خاک بود. این اقدامات، همراه با ممنوعیت چرای دام، موجب تقویت پوشش گیاهی و بهبود شرایط خاک شده است. در مقابل، حوضه شاهد همچنان در معرض چرای بی‌رویه و مدیریت نادرست قرار دارد که منجر به تخریب شدید خاک و کاهش کارایی هیدرولوژیکی آن شده است. همچنین، در این مطالعه تأثیر جهت دامنه بر نفوذپذیری خاک مورد توجه قرار گرفت. به همین منظور، در هر یک از زیرحوضه‌ها سه دامنه شمالی و سه دامنه جنوبی به‌عنوان نقاط آزمایش نفوذپذیری انتخاب شدند. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری را نشان می‌دهد.

با توجه به اهمیت نفوذپذیری خاک در مدیریت منابع آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، و ضرورت بررسی تأثیر اقدامات مدیریتی و احیایی، پژوهش حاضر با هدف مقایسه کارایی پنج معادله نفوذ (هورتون، کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوئیس، فیلیپ و SCS) در دو حوضه زوجی گنبد همدان (یکی احیا شده و دیگری شاهد) انجام شد. این پژوهش به‌طور خاص به دنبال پاسخ به این پرسش است که کدام معادلات نفوذ در شرایط مدیریتی متفاوت (احیا شده و شاهد) دقت بالاتری دارند و تا چه اندازه اقدامات مدیریتی موجب بهبود ظرفیت نفوذپذیری خاک شده‌اند. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای انتخاب مدل‌های نفوذ در پروژه‌های مشابه و تدوین راهبردهای مدیریتی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

این پژوهش در حوضه‌های زوجی گنبد واقع در استان همدان، ایران، انجام شده است. این منطقه شامل دو زیرحوضه با شرایط مدیریتی متفاوت است: حوضه احیا شده به مساحت تقریبی ۱۴۵ هکتار و حوضه شاهد به مساحت ۱۴۳ هکتار. مجاورت این دو حوضه فرصت منحصربه‌فردی را برای مقایسه اثرات احیای پوشش گیاهی بر ویژگی‌های خاک در شرایط اقلیمی و توپوگرافی مشابه فراهم کرده است. این منطقه بر اساس شاخص خشکی دُمارتن در دسته مناطق نیمه‌خشک قرار می‌گیرد و متوسط بارش سالانه آن ۳۹۶/۸ میلی‌متر است که



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری

جدول ۱. نقاط نمونه برداری و خصوصیات خاک

نقطه نمونه برداری	علامت اختصاری	بافت خاک	وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)	تخلخل (درصد)
دامنه رو به شمال	R-NF	رس لومی	۱/۱۱	۵۴/۸
دامنه رو به جنوب	R-SF	رس	۱/۲۱	۴۵/۵
دامنه رو به شمال	C-NF	رس لومی	۱/۲۶	۴۵/۶
دامنه رو به جنوب	C-SF	رس	۱/۳۷	۷/۳۷

داده‌های میدانی

روش استوانه مضاعف به دلیل کاهش تأثیر جریان جانبی و ارائه تخمین دقیق از نرخ نفوذ آب به خاک، یکی از معتبرترین روش‌ها برای اندازه‌گیری نفوذپذیری محسوب می‌شود. همانطور که اشاره شد برای بررسی نفوذپذیری خاک در حوضه زوجی گنبد همدان، نقاط نمونه برداری به گونه‌ای انتخاب شدند که تفاوت‌های مدیریتی و توپوگرافی به خوبی نمایان شوند. در هر یک از زیرحوضه‌های احیا شده و شاهد، سه دامنه رو به شمال و سه دامنه رو به جنوب به عنوان نقاط نمونه برداری انتخاب شد. جدول ۱ نام گذاری نقاط نمونه برداری و برخی خصوصیات خاک در این نقاط را نشان می‌دهد. آزمایش نفوذپذیری خاک با استفاده از روش استوانه مضاعف انجام شد (Bouwer, 1986; ASTM, 2003). در هر نقطه، دو استوانه فولادی هم‌مرکز با قطرهای داخلی و خارجی به ترتیب ۲۰ و ۴۰ سانتی متر تا عمق ۱۰ سانتی متر در خاک فرو برده شد. آب درون حلقه‌ها ریخته تا عمق ثابت حفظ شود و از جریان جانبی جلوگیری شود. در ادامه قرائت‌های نفوذ در بازه‌های زمانی ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۵، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه انجام شد و ارتفاع آب نفوذ یافته در جدول‌های از پیش تعیین شده یادداشت شد. ضمناً آزمایش در شرایطی انجام شد که بیش از ۱۰ روز از بارندگی قبلی گذشته بود تا اثر رطوبت پیشین خاک از بین رفته باشد و نتایج دقیق‌تری به دست آید. شکل ۲ تصاویری از اندازه‌گیری نفوذ به روش استوانه مضاعف را نشان می‌دهد.

مدل سازی نفوذپذیری

حرکت آب به داخل منافذ خاک بر اساس قانون داریسی صورت می‌گیرد، اما این قانون قادر به پیش‌بینی تغییرات زمانی سرعت و مقدار نفوذ آب نیست. از آنجا که در مدیریت منابع آب، اطلاع از میزان نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ در هر لحظه اهمیت زیادی دارد، معادلات متعددی برای توصیف این فرآیند توسعه یافته‌اند (Alizadeh, 2014). در این پژوهش، شش معادله متداول شامل هورتون، کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوئیس، گرین-آمپت، فیلیپ، و معادله حفاظت خاک آمریکا (SCS) به کار گرفته شد که در جدول ۲ جزئیات فرمولاسیون و ضرایب آن‌ها ارائه شده است.

معادله کوستیاکوف، که بر اساس یک رابطه توانی ساده تعریف شده است، برای توصیف نفوذ تجمعی در طول زمان به کار می‌رود و به دلیل سادگی و کاربرد گسترده، در مطالعات هیدرولوژیکی بسیار محبوب است (Furman, 2006; Javadi & Zamani, 2016). نسخه اصلاح شده این معادله، یعنی معادله کوستیاکوف-لوئیس، نرخ نفوذ نهایی را نیز در نظر می‌گیرد که باعث افزایش دقت پیش‌بینی در شرایط واقعی می‌شود (Marqasi et al., 2023; Javadi and Zamani, 2016). معادله فیلیپ، با در نظر گرفتن مکانیسم‌های مویینگی و گرانشی، در شرایطی که جبهه نفوذ به آهستگی گسترش می‌یابد، عملکرد مطلوبی از خود نشان می‌دهد (Poozen et al., 2020; Valiantzas et al., 2009).



شکل ۲. اندازه‌گیری میدانی نفوذپذیری به روش استوانه مضاعف

جدول ۲. مدل‌های نفوذ آب به خاک و ضرایب آنها

نام مدل	معادله نفوذ	پارامتر	تعریف پارامترها
کوستیاکوف	$F(t) = Kt^a$	K, a	K : ضریب نفوذپذیری، a : ضریب توانی
کوستیاکوف-لوئیس	$F(t) = kt^a + f_0t$	a, k, f_0	K : ضریب نفوذپذیری، a : ضریب توانی، f_0 : سرعت اولیه نفوذ (میلیمتر بر ساعت)
فیلیپ	$F(t) = St^{\frac{1}{2}} + kt$	S, K	K : ضریب ثابت هدایت هیدرولیکی، S : ضریب مکش یا جذب خاک
هورتون	$F(t) = f_c t + \frac{(f_0 - f_c)}{k}(1 - e^{-kt})$	f_0, f_c, K	f_0 : سرعت اولیه نفوذ (میلیمتر بر ساعت)، f_c : سرعت نهایی نفوذ (میلیمتر بر ساعت)، K : ضریب کاهش نفوذ
حفاظت خاک آمریکا (SCS)	$F(t) = at^b + 0.6985$	a, b	a و b : ضرایب سازمان حفاظت خاک آمریکا

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Z_0 - Z_c)^2}{n}} \quad (۲)$$

معیار MAE نیز میزان خطای مطلق بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر اندازه‌گیری‌شده را نشان می‌دهد و با استفاده از معادله (۳) قابل محاسبه است.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Z_0 - Z_c|}{n} \quad (۳)$$

هرچه مقدار این معیار کوچک‌تر باشد، به معنای این است که خطای برآورد مقدار نفوذ تجمعی از مدل‌های به‌دست آمده کمتر است.

ضریب NSE عملکرد مدل را با مقایسه میزان انحراف پیش‌بینی‌های مدل از مشاهدات و انحراف مشاهدات از میانگین آن‌ها ارزیابی می‌کند و با استفاده از معادله (۴) محاسبه می‌شود.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Z_0 - Z_c)^2}{\sum_{i=1}^n (Z_0 - \bar{Z}_0)^2} \quad (۴)$$

مقدار این شاخص بین $-\infty$ تا یک متغیر است. مقدار یک نشان‌دهنده تطابق کامل پیش‌بینی‌ها با داده‌های مشاهده‌شده است، مقدار صفر نشان‌دهنده عملکرد مشابه با استفاده از میانگین داده‌ها است و مقادیر منفی نشان‌دهنده عملکرد ضعیف‌تر از میانگین داده‌ها است.

نتایج

جدول ۳، نتایج کالیبراسیون مدل‌های نفوذ تجمعی آب در خاک و پارامترهای بهینه شده آنها را برای نقاط مختلف نمونه‌برداری در دو زیرحوضه احیاشده، دامنه شمالی ($R-NF^A$) و جنوبی ($R-SF^A$)، و همچنین زیرحوضه شاهد، دامنه شمالی ($C-NF^{10}$) و جنوبی ($C-SF^{11}$) ارائه می‌دهد. این معادلات شامل مدل‌های کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوئیس، فیلیپ، هورتون و SCS هستند که با استفاده از داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده، ضرایب هر مدل در نقاط مختلف تعیین شده است. سپس با به‌کارگیری ابزار Solver و حداقل‌سازی خطای بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و داده‌های تجربی، ضرایب معادلات بهینه‌سازی و اصلاح شده‌اند.

در مقابل، معادله هورتون تغییرات نرخ نفوذ را در طول زمان مدل‌سازی کرده و نشان می‌دهد که این نرخ در ابتدا زیاد است و با گذشت زمان کاهش یافته و به مقدار ثابتی می‌رسد، که آن را به گزینه‌ای مناسب برای شرایط کاهش تدریجی نفوذ تبدیل می‌کند (Mohammadi & Refahi, 2004; Yang et al., 2020). معادله حفاظت خاک آمریکا (SCS) نیز برای رواناب و نفوذ تجمعی طراحی شده و در مدیریت حوضه‌های آبخیز مناطق خشک و نیمه‌خشک کاربرد ویژه‌ای دارد (Hoyos & Cavalcante, 2015; Goodarzi et al., 2012).

مدل‌سازی این معادلات برای همه‌ی نقاط نمونه‌برداری شامل دامنه شمالی حوضه احیا شده ($R-NF$)، دامنه جنوبی حوضه احیا شده ($R-SF$)، دامنه شمالی حوضه شاهد ($C-NF$) و دامنه جنوبی حوضه شاهد ($C-SF$) با سه تکرار انجام شد. برای برازش داده‌های آزمایشی و تعیین ضرایب معادلات نفوذپذیری، از ابزار Solver در نرم‌افزار Excel استفاده شد. این ابزار با حداقل‌سازی خطای بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و داده‌های تجربی، ضرایب معادلات را بهینه‌سازی کرد. فرآیند برازش برای هر معادله به‌صورت جداگانه انجام و نتایج به‌دست‌آمده برای مقایسه عملکرد مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

برای ارزیابی نتایج از چهار معیار ضریب همبستگی (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، ضریب نش-ساتکلیف (NSE) استفاده شد. R^2 تطابق داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل با داده‌های تجربی را اندازه‌گیری می‌کند. مقدار نزدیک به یک نشان‌دهنده تطابق بالا است و از معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Z_0 - Z_c)^2}{\sum_{i=1}^n (Z_0 - \bar{Z}_0)^2} \quad (۱)$$

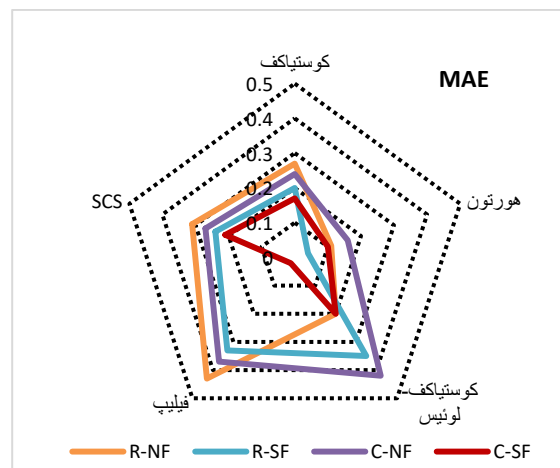
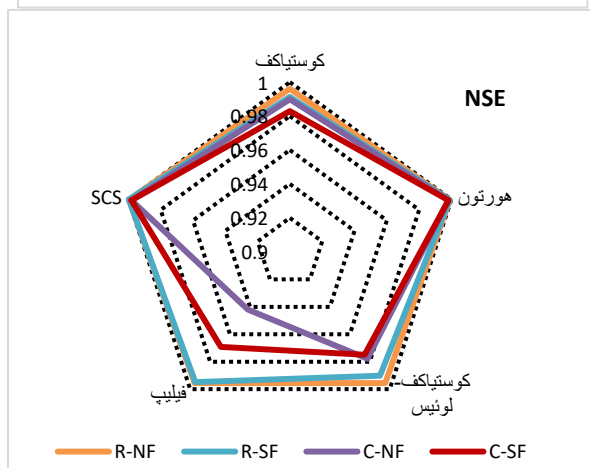
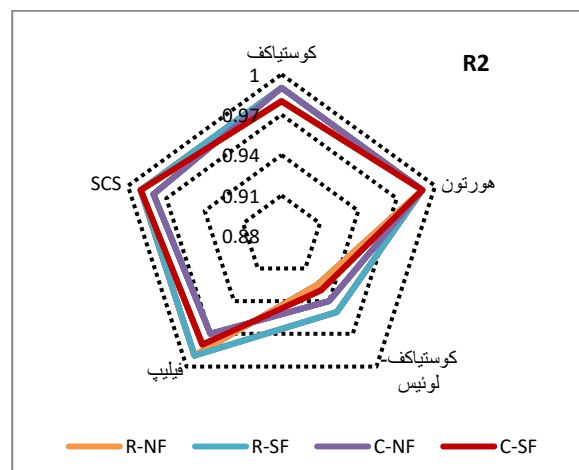
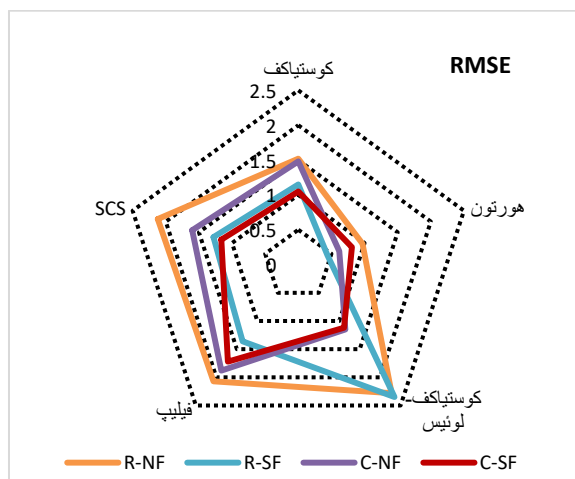
که در آن، Z_0 مقدار نفوذ تجمعی مشاهداتی، $\bar{Z}_0$ میانگین مقادیر مشاهداتی نفوذ تجمعی، Z_c نفوذ تجمعی محاسبه شده و n تعداد مشاهدات است. معیار RMSE میزان انحراف پیش‌بینی‌های مدل از مقادیر واقعی را کمی‌سازی می‌کند که براساس ریشه مربعات خطا و به شرح معادله (۲) مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

جدول ۳. مدل‌های کالیبره شده نفوذ تجمعی آب در خاک

نقاط نمونه‌برداری				مدل نفوذ تجمعی
C-SF	C-NF	R-SF	R-NF	کوستیاکف
$F(t) = 4.284t^{0.428}$	$F(t) = 5.545t^{0.469}$	$F(t) = 5.583t^{0.505}$	$F(t) = 8.274t^{0.535}$	
$F(t) = 4.045t^{0.37} + 0.1t$	$F(t) = 4.97t^{0.45} + 0.1t$	$F(t) = 5.970t^{0.45} + 0.1t$	$F(t) = 8.631t^{0.50} + 0.1t$	کوستیاکف-لونیس
$F(t) = 2.794t^{\frac{1}{2}} + 0.056t$	$F(t) = 4.874t^{\frac{1}{2}} + 0.1t$	$F(t) = 4.966t^{\frac{1}{2}} + 0.091t$	$F(t) = 8.834t^{\frac{1}{2}} + 0.089t$	فیلیپ
$F(t) = 0.1t + \frac{1.2}{0.1}(1 - e^{-0.1t})$	$F(t) = 0.2t + \frac{2}{0.1}(1 - e^{-0.1t})$	$F(t) = 0.4t + \frac{1.9}{0.1}(1 - e^{-0.1t})$	$F(t) = 0.6t + \frac{3.7}{0.1}(1 - e^{-0.1t})$	هورتون
$F(t) = 3.17t^{0.49} + 0.6985$	$F(t) = 5.16t^{0.48} + 0.6985$	$F(t) = 4.15t^{0.57} + 0.6985$	$F(t) = 7.93t^{0.54} + 0.6985$	SCS

چندین متغیر بر روی یک محور مرکزی، به ما این امکان را می‌دهند که به‌طور همزمان و جامع، عملکرد مدل‌ها را در نقاط نمونه‌برداری مختلف مقایسه کنیم. در تحلیل نمودارهای راداری، بهترین مدل بر اساس نزدیکی مقادیر هر معیار به مقدار مطلوب آن ارزیابی می‌شود. بنابراین، در نمودارهای راداری، مدلی که خطوط آن در معیارهای مطلوب به سمت مقادیر بهینه (برای R^2 و NSE به ۱ و برای RMSE و MAE به مرکز) نزدیک‌تر باشد، به عنوان مدل بهتر و دقیق‌تر شناخته می‌شود.

ارزیابی مدل‌های نفوذ تجمعی آب در خاک یکی از مراحل مهم برای تحلیل دقت پیش‌بینی و تعیین مناسب‌ترین مدل برای شرایط خاص است. در این پژوهش، معیارهای آماری ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE) و ضریب نش-ساتکلیف (NSE) برای مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف نفوذ مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج این ارزیابی در شکل ۳ به‌صورت نمودارهای راداری ارائه شده‌اند. این نوع نمودارها با نمایش



شکل ۳. مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف نفوذ تجمعی آب با استفاده از معیارهای ارزیابی R^2 ، RMSE، MAE و NSE در نقاط نمونه‌برداری مختلف با استفاده از نمودارهای راداری

سمت مقدار پایدار میل می‌کند. بیشترین مقدار سرعت نفوذ اولیه در دامنه شمالی حوضه احیا شده (R-NF) با $293/33$ میلی‌متر بر ساعت در دقیقه اول ثبت شد که در دقیقه 120 به $35/33$ میلی‌متر بر ساعت کاهش یافت. این مقادیر بالا را می‌توان ناشی از بهبود شرایط فیزیکی خاک و افزایش تخلخل در اثر پوشش گیاهی متراکم دانست. در مقابل، دامنه جنوبی حوضه شاهد (C-SF) کمترین مقادیر سرعت نفوذ را داشت (کاهش از $106/66$ به $7/33$ میلی‌متر بر ساعت) که ناشی از تراکم خاک، کمبود پوشش گیاهی و تبخیر بالا در این دامنه است.

مقایسه مدل‌ها نشان داد که هورتون و SCS بیشترین دقت را در بازنمایی روند کاهش سرعت نفوذ داشتند و قادر به پیش‌بینی نزدیک به داده‌های مشاهداتی بودند. مدل‌های کوستیاکوف و کوستیاکوف-لوئیس در زمان‌های اولیه بیش‌برآورد داشتند، زیرا فرضیات ساده‌سازی شده آن‌ها در خصوص رطوبت اولیه و سرعت نفوذ پایدار باعث کاهش دقت می‌شود. مدل فیلیپ نیز اگرچه در دامنه‌های مرطوب‌تر عملکرد مناسبی داشت، اما در شرایط خشک و درازمدت دقت کمتری نشان داد.

این یافته‌ها همسو با مطالعات موسوی دهموردی و همکاران (۱۳۹۸) است که برتری مدل هورتون در پیش‌بینی تغییرات زمانی سرعت نفوذ را گزارش کردند. همچنین نتایج با پژوهش‌های هویوس و کوالکاپ^{۱۴} (۲۰۱۵) و شین^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد که نشان دادند مدل‌های مبتنی بر در نظر گرفتن کاهش تدریجی سرعت نفوذ، در شرایط مناطق خشک و نیمه‌خشک دقت بیشتری دارند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد بهتر مدل‌های هورتون و SCS نه تنها ناشی از ساختار انعطاف‌پذیر معادلات آن‌هاست، بلکه به دلیل توانایی آن‌ها در بازنمایی شرایط واقعی خاک و اثرات اقدامات احیایی نیز می‌باشد.

بحث و نتیجه‌گیری

بحث

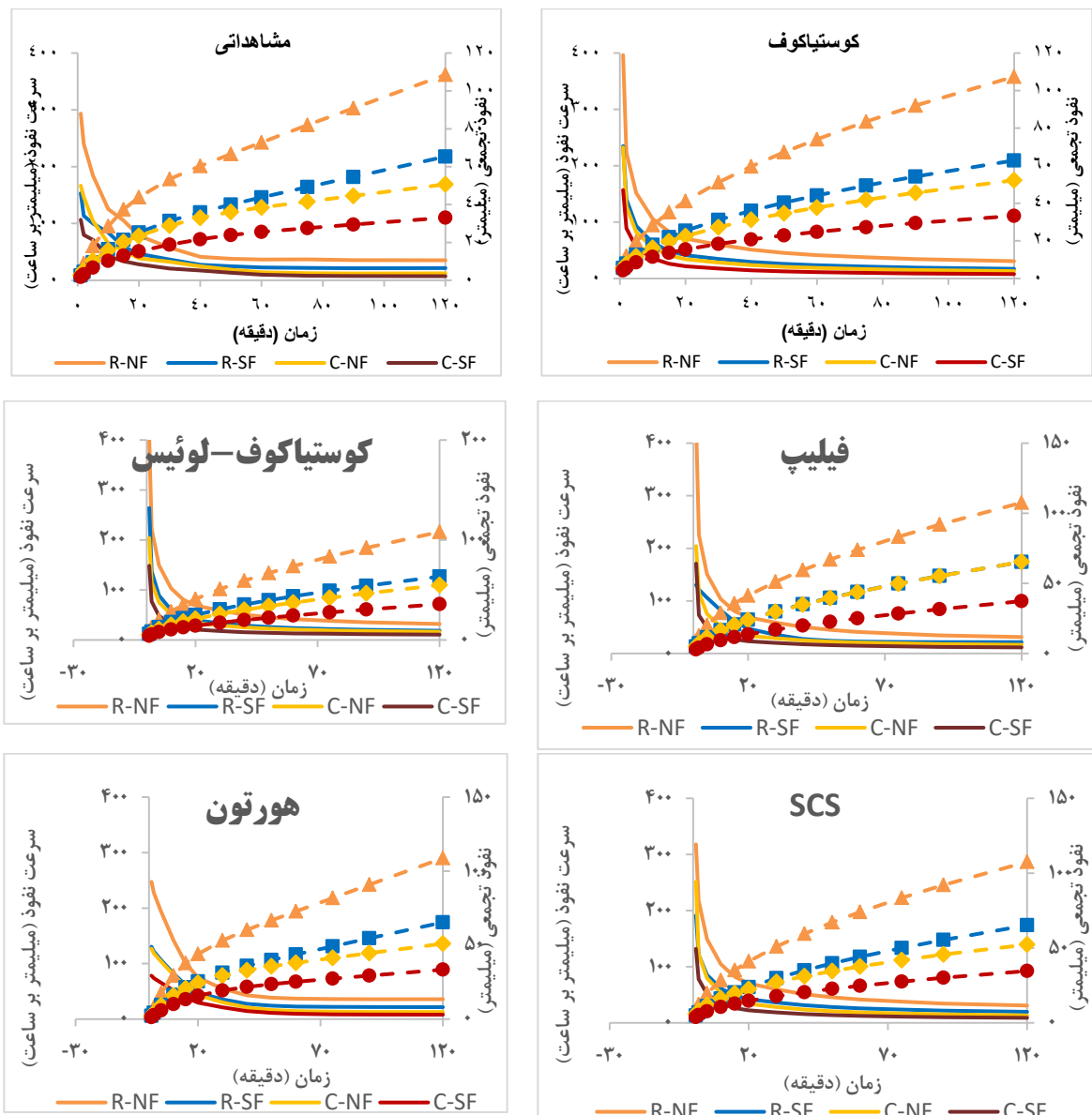
ارزیابی مدل‌های نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ لحظه‌ای در مناطق خشک و نیمه‌خشک، یکی از ابزارهای کلیدی برای درک رفتار هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آب و خاک است. این تحلیل‌ها نه تنها در شناسایی مدل‌های مناسب‌تر کاربرد دارند، بلکه می‌توانند به طراحی اقدامات مدیریتی و احیایی مؤثرتر منجر شوند. در این پژوهش، کارایی چندین مدل متداول نفوذ در شرایط دو حوضه زوجی (احیا شده و شاهد) در منطقه گنبد همدان بررسی گردید. نتایج به‌روشنی نشان داد که اقدامات مدیریتی مانند تقویت پوشش گیاهی و کنترل چرای دام، اثر مستقیم و معناداری در افزایش ظرفیت نفوذ خاک داشته‌اند.

مقایسه عملکرد مدل‌ها بیانگر آن بود که مدل‌های هورتون و SCS بهترین برازش را با داده‌های مشاهداتی ارائه کردند. مدل هورتون به‌ویژه به دلیل توانایی در بازنمایی کاهش تدریجی

بر اساس شکل ۳، مقایسه معیارهای ارزیابی نشان داد که مدل‌های هورتون، SCS و فیلیپ دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها داشتند. مقدار R^2 در این مدل‌ها به مقادیر نزدیک به یک رسید که بیانگر تطابق بسیار خوب پیش‌بینی‌ها با داده‌های مشاهداتی است. در مقابل، مدل کوستیاکوف-لوئیس کمترین مقادیر R^2 را ارائه داد. بررسی RMSE و MAE نیز نشان داد که مدل هورتون در تمامی دامنه‌ها کمترین خطا را ثبت کرده است؛ این امر ناشی از توانایی این مدل در بازنمایی کاهش تدریجی سرعت نفوذ در طول زمان است. مدل SCS نیز با در نظر گرفتن شرایط هیدرولوژیکی و انعطاف‌پذیری بالا، عملکرد مناسبی نشان داد. در حالی که مدل کوستیاکوف-لوئیس به دلیل فرضیات ساده‌سازی شده، در برآوردهای اولیه دچار بیش‌برآورد شد و همین امر باعث افزایش مقادیر RMSE و MAE گردید. از سوی دیگر، مقادیر NSE بالاتر از $0/9$ برای اکثر مدل‌ها بیانگر قابلیت مناسب آن‌ها در بازتولید داده‌های مشاهداتی است. با این حال، مدل هورتون بالاترین مقدار NSE را در تمامی دامنه‌ها به دست آورد. این نتایج همسو با یافته‌های موسوی دهموردی^{۱۲} و همکاران (۱۳۹۸) و یانگ^{۱۳} و همکاران (۲۰۲۰) است که دقت بالای مدل هورتون را در شرایط مشابه گزارش کرده‌اند. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که انعطاف‌پذیری بیشتر مدل‌های هورتون و SCS در بازنمایی شرایط واقعی خاک و رطوبت، علت اصلی برتری آن‌ها نسبت به سایر مدل‌ها در این پژوهش بوده است.

نتایج تحلیل نفوذ تجمعی نشان داد که بیشترین مقدار در دامنه شمالی حوضه احیا شده (R-NF)، با مقدار مشاهداتی $108/55$ میلی‌متر در دقیقه 120 ثبت شد. مدل‌های هورتون و SCS به ترتیب با مقادیر $108/73$ و $107/58$ میلی‌متر بهترین تطابق را داشتند، در حالی که مدل‌های فیلیپ، کوستیاکوف، و کوستیاکوف-لوئیس کمی اختلاف نشان دادند. در حوضه احیا شده (R-SF)، نفوذ تجمعی مشاهداتی $65/33$ میلی‌متر بود و مدل‌های هورتون ($65/37$ میلی‌متر) و SCS ($65/22$ میلی‌متر) نزدیک‌ترین پیش‌بینی‌ها را ارائه کردند. برای دامنه شمالی حوضه شاهد (C-NF)، مقدار $50/66$ میلی‌متر مشاهده شد و مدل‌های هورتون و SCS با مقادیر $50/97$ و $52/35$ میلی‌متر تطابق خوبی نشان دادند. کمترین مقدار نفوذ تجمعی در دامنه جنوبی حوضه شاهد (C-SF) با مقدار مشاهداتی $33/11$ میلی‌متر به دست آمد و مدل هورتون، به همراه مدل کوستیاکوف، پیش‌بینی‌های بهتری داشتند.

نتایج تحلیل شکل ۴ نشان داد که در تمامی دامنه‌ها سرعت نفوذ لحظه‌ای در دقایق اولیه بسیار بالا بود و سپس با گذشت زمان کاهش یافت. این روند ناشی از پر شدن سریع منافذ درشت خاک و کاهش تدریجی نیروی مکش مویینگی است، به‌طوری که پس از اشباع نسبی خاک، تنها نیروی ثقل عامل نفوذ بوده و سرعت به



شکل ۴. نمودارهای نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ با استفاده از مدل‌های مختلف نفوذ در نقاط نمونه‌برداری

لحاظ رطوبت اولیه خاک است؛ مسئله‌ای که پیش‌تر نیز توسط کابون^{۲۰} (۱۹۹۸) گزارش شده است. با این حال، در شرایطی که داده‌ها محدود باشند و هدف برآورد کلی نفوذ در مدت‌زمان کوتاه باشد، این مدل‌ها همچنان قابل استفاده‌اند. مدل فیلیپ به دلیل پایه‌گذاری بر مکانیزم‌های فیزیکی نفوذ، در دامنه‌های شمالی با رطوبت بیشتر عملکرد مناسبی داشت، اما در شرایط خشک و بلندمدت دقت آن کاهش یافت. این یافته با مطالعات والیانتر^{۲۱} و همکاران (۲۰۰۹) همخوانی دارد که محدودیت‌های مدل فیلیپ را در شرایط خشک گزارش کرده‌اند.

مقایسه بین حوضه‌ها نشان داد که حوضه احیا شده نسبت به حوضه شاهد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ بیشتری ثبت کرد. این تفاوت به‌ویژه در دامنه شمالی حوضه احیا شده چشمگیر بود که می‌توان آن را ناشی از افزایش تخلخل خاک، تثبیت

سرعت نفوذ در طول زمان، توانست در تمامی دامنه‌ها دقت بالایی داشته باشد. این ویژگی در همخوانی با یافته‌های موسوی دهموردی^{۱۶} و همکاران (۱۳۹۸) و یانگ^{۱۷} و همکاران (۲۰۲۰) است که کارایی بالای مدل هورتون را در شرایط متغیر رطوبتی گزارش کرده‌اند. مدل SCS نیز به‌واسطه سادگی، انعطاف‌پذیری و امکان تنظیم بر اساس ویژگی‌های هیدرولوژیکی محلی، عملکرد مطلوبی نشان داد. این نتیجه همسو با مطالعات کاوسی^{۱۸} و همکاران (۱۳۹۲) و سونگ^{۱۹} و همکاران (۲۰۲۱) است که کاربرد گسترده مدل SCS را در مدیریت حوضه‌های آبخیز مناطق خشک و نیمه‌خشک تأیید کرده‌اند.

در مقابل، مدل‌های کوستیاکوف و کوستیاکوف-لوئیس در زمان‌های اولیه مقادیر بیش‌برآوردی ارائه دادند. این موضوع ناشی از ساده‌سازی بیش از حد در ساختار این معادلات و عدم

یافته‌های این پژوهش نشان داد که در شرایط مناطق خشک و نیمه‌خشک، عملکرد مدل‌های نفوذ وابسته به ویژگی‌های خاک، شرایط رطوبتی و اقدامات مدیریتی است. در میان مدل‌های بررسی‌شده، مدل‌های هورتون و SCS بالاترین دقت را در شبیه‌سازی نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ لحظه‌ای داشتند و توانستند روند واقعی کاهش سرعت نفوذ در طول زمان را بازنمایی کنند. در مقابل، مدل‌های کوستیاکوف و کوستیاکوف-لوئیس در دقایق اولیه دچار بیش‌برآورد شدند و دقت پایین‌تری داشتند، در حالی‌که مدل فیلیپ در دامنه‌های مرطوب‌تر عملکرد مناسبی داشت اما در شرایط خشک محدودیت‌هایی نشان داد.

مقایسه دو حوضه نشان داد که اجرای اقدامات مدیریتی و احیایی مانند تقویت پوشش گیاهی و کنترل چرای دام به‌طور مستقیم باعث بهبود نفوذپذیری و کاهش رواناب سطحی می‌شود. به‌ویژه دامنه‌های شمالی به دلیل شرایط میکروکلیمایی مناسب‌تر، بالاترین مقادیر نفوذ را ثبت کردند. این نتایج اهمیت اقدامات احیایی در ارتقای ویژگی‌های فیزیکی خاک و بهبود کارکرد هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز را تأیید می‌کند.

بر این اساس، استفاده از مدل‌های هورتون و SCS به‌عنوان ابزارهای کارآمد برای شبیه‌سازی نفوذ و طراحی پروژه‌های مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک توصیه می‌شود. همچنین، توجه به مدیریت پوشش گیاهی و بهبود ساختار خاک می‌تواند نقشی اساسی در افزایش پایداری حوضه‌های آبخیز داشته باشد.

برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود از داده‌های بلندمدت و روش‌های نوین مانند مدل‌سازی هوشمند و رویکردهای ترکیبی استفاده شود تا امکان تعمیم‌پذیری نتایج و ارائه راهکارهای دقیق‌تر برای مدیریت پایدار منابع آب و خاک فراهم گردد.

تشکر و قدردانی

از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان همدان که با ارائه اطلاعات و نقشه‌های ضروری و فراهم کردن شرایط لازم، امکان انجام آزمایش‌های میدانی را فراهم کردند، سپاسگزاریم.

ساختار سطحی و حفظ رطوبت بیشتر در اثر پوشش گیاهی تراکم دانست. چنین نتایجی با پژوهش‌های فاضل‌پور عقدایی^{۲۲} و همکاران (۱۳۹۵) و هوپوس و کاوالکاپ^{۲۳} (۲۰۱۵) مطابقت دارد که نقش مثبت بازسازی پوشش گیاهی در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و افزایش نفوذ را گزارش کرده‌اند. در مقابل، حوضه شاهد به دلیل چرای مفرط و تخریب پوشش گیاهی، تراکم خاک بیشتری داشت و مقادیر نفوذ در آن به‌مراتب کمتر بود. این امر با یافته‌های بارانی^{۲۴} و همکاران (۱۳۷۹) و برخورداری^{۲۵} و همکاران (۱۳۹۵) همسو است که تخریب ناشی از فرسایش و کاهش کیفیت سطحی خاک را از عوامل اصلی کاهش نفوذ معرفی کردند.

تفاوت‌های دامنه‌های شمالی و جنوبی نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. دامنه‌های شمالی، به دلیل دریافت تابش کمتر، دمای پایین‌تر و شرایط رطوبتی مساعدتر، مقادیر نفوذ بیشتری نسبت به دامنه‌های جنوبی داشتند. این نتایج با مطالعات یانگ^{۲۶} و همکاران (۲۰۱۶) فاضل‌پور عقدایی^{۲۷} و همکاران (۱۳۹۵) که تأثیر میکروکلیم بر فرآیند نفوذ را بررسی کرده‌اند، همخوانی دارد. دامنه‌های جنوبی، به دلیل تابش مستقیم خورشید، تبخیر بیشتر و تراکم بالاتر سطح خاک، ظرفیت کمتری برای نگهداری رطوبت و در نتیجه نفوذ پایین‌تر داشتند؛ موضوعی که در مطالعات شین^{۲۸} و همکاران (۲۰۱۹) و طالبی و همکاران (۱۳۹۳) نیز گزارش شده است.

به‌طور کلی، این پژوهش نشان داد که انتخاب مدل مناسب برای شبیه‌سازی نفوذ نه‌تنها به شرایط اقلیمی و خاکی بستگی دارد، بلکه به نوع مدیریت و اقدامات احیایی نیز وابسته است. نتایج تأکید می‌کند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مدل‌های هورتون و SCS به دلیل دقت بالا و انعطاف‌پذیری، گزینه‌های مناسبی برای مطالعات مشابه هستند. همچنین، اقدامات مدیریتی مانند تقویت پوشش گیاهی و جلوگیری از چرای مفرط می‌توانند به‌طور مستقیم ظرفیت نفوذپذیری خاک را ارتقا دهند و نقش مؤثری در کاهش رواناب و فرسایش ایفا کنند.

نتیجه‌گیری

Reference:

- Alizadeh, A. (2014). *Water, Soil, and Plant Relationship*. Ferdowsi University Press, 722 pages. [In Persia].
- ASTM (2003) D3385-03 standard test method for infiltration rate of soils in field using double-ring infiltrometer. Annual Book of ASTM Standards 04.08. ASTM, West Conshohocken, Penn
- Barani, GH. A. Khanjani, M.J. Skafi, M. (2000). Recalibration of infiltration equation US Soil Protection Organization by least squares method. *Agriculture*, 2(1): 43-50. [In Persia].
- Barkhordari, J. Nikkami, D. Samadi, M. Tabatabaeizadeh, M. (2015). Suitability of different rainfall erosivity indices in cold, dry climate of central Iran, a case study in Nir rangeland research station-Yazd Province *Watershed Engineering and Management*, 7(2), 136-144. [In Persia]
- Bouwer, H. (1986). Intake rate: cylinder infiltrometer. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 825-844.

- Cahoon, Joel. "Kostiakov infiltration parameters from kinematic wave model." *Journal of irrigation and drainage engineering* 124.2 (1998): 127-130.
- Fakhernikche, A., Vafakhah, M., & Sadeghi, S.H. (2014). Evaluation of the performance of various cumulative infiltration models in different land use types and soil textures using a rain simulator. *Soil and Water Science Journal*, 24(1), 183-193. [In Persia].
- Fazelpour Aghdaei, M., Malekinejad, H., Ekhtesasi, M., & Barkhordari, J. (2016). Efficiency of infiltration equations and analysis of surface permeability in flood spreading areas of Yazd province. *Watershed Engineering and Management Journal*, 8(3), 264-274. [In Persia].
- Furman, A., Warrick, A. W., Zerihun, D., & Sanchez, C. A. (2006). Modified Kostiakov infiltration function: Accounting for initial and boundary conditions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 132(6), 587-596.
- Goodarzi, L. Akhundali, A.M. and Zarei, H. (2012). Evaluation and determination of coefficients of water infiltration models in the Ashtarinan Plain. *Soil and Water Resources Conservation*, 1(3), 39-45. [In Persia]
- Hoyos, E. M., & Cavalcante, A. L. B. (2015). Sensitivity analysis of one-dimensional infiltration models. *EJGA*, 20, 4313-4324.
- Javadi, A. Zamani, N. (2016). Sensitivity analysis of coefficients of different infiltration equations to changes in soil moisture and water load. National Congress of Irrigation and Drainage of Iran. SID. <https://sid.ir/paper/872336/fa>. [In Persia]
- Kavousi, M. Vatankhah, M. Vafakhah, M. (2013). Evaluation of Some Infiltration Models for Different Land Uses in Kojour Watershed. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 4(1), 1-13. [In Persia]
- Mohammadi, M. H., & Refahi, R. (2004). Estimation of infiltration equation parameters by soil physical characteristic. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 36(6), 1391-1398 [In Persia]
- Marqasi, M., Hashemi, S. R., Siuki, A. K., Shahidi, A., & Neyshabouri, S. Z. (2023). Simulation model of water infiltration in soil using combination technique. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(11), 102550.
- Mousavi Dehmurdi, M., Ghorbani Dashtaki, Sh., & Mashayekhi, P. (2019). Comparison of the performance of some water infiltration models into soil based on data obtained from double-ring infiltrometers and HYDRUS-1D software. *Applied Soil Research Journal*, 7(2), 182-195. [In Persia]
- Poozen, M. T., Chari, M. M. Afrasiab, P. (2020). Evaluation Different Methods of Scaling the Philip Equation. *Journal of Water and Soil*, 34(1), 27-42. [In Persia]
- Rasool, T., Dar, A. Q., & Wani, M. A. (2021). Development of a predictive equation for modelling the infiltration process using gene expression programming. *Water Resources Management*, 35, 1871-1888.
- Sadegh Zadeh, K. S., Shirmohammadi, A., Montas, H. J., & Felton, G. (2007). Evaluation of infiltration models in contaminated landscape. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 42(7), 983-988.
- Shin, S. S., Park, S. D., Pierson, F. B., & Williams, C. J. (2019). Evaluation of physical erosivity factor for interrill erosion on steep vegetated hillslopes. *Journal of Hydrology*, 571, 559-572.
- Song, W., Jiao, J., Du, P., & Liu, H. (2021). Optimizing the soil conservation service curve number model by accounting for rainfall characteristics: a case study of surface water sources in Beijing. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 1-17.
- Talebi, A., Pourmohammadi, S., & Rahimian, M.H. (2014). Determining the most suitable permeability equation for watersheds in dry and semi-dry areas (Case study: Maneshad watershed, Yazd province). *Soil and Water Science Journal*, 24(4), 101-114. [In Persia]
- Vaezi, A., Behtari, M., & Foroumd, M. (2019). Evaluation of water infiltration models in soils with different textures under various initial moisture content levels. *Ecohydrology*, 6(3), 707-717. [In Persia].
- Valiantzas, J. D., Pollalis, E. D., Soulis, K. X., & Londra, P. A. (2009). Modified form of the extended Kostiakov equation including various initial and boundary conditions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 135(4), 450-458.
- Xin, Y., Xie, Y., & Liu, Y. (2019). Effects of residue cover on infiltration process of the black soil under rainfall simulations. *Water*, 11(12), 2593.
- Yang, M., Zhang, Y., & Pan, X. (2020). Improving the Horton infiltration equation by considering soil moisture variation. *Journal of Hydrology*, 586, 124864.

¹ Talebi
² Fazelpour Aghdaei
³ Shin
⁴ Yang
⁵ Valiantzas
⁶ Rasool

- ⁷ *Xin*
- ⁸ *Restored Watershed-North Facing Slope*
- ⁹ *Restored Watershed-South Facing Slope*
- ¹⁰ *Control Watershed-North Facing Slope*
- ¹¹ *Control Watershed-South Facing Slope*
- ¹² *Mousavi Dehmurdi*
- ¹³ *Yang*
- ¹⁴ *Hoyos & Cavalcante*
- ¹⁵ *Shin*
- ¹⁶ *Mousavi Dehmurdi*
- ¹⁷ *Yang*
- ¹⁸ *Kavousi*
- ¹⁹ *Song*
- ²⁰ *Cahoon*
- ²¹ *Valiantzas*
- ²² *Fazelpour Aghdaei*
- ²³ *Hoyos & Cavalcante*
- ²⁴ *Barani*
- ²⁵ *Barkhordari*
- ²⁶ *Yang*
- ²⁷ *Fazelpour Aghdaei*
- ²⁸ *Shin*