

Performance assessment of the artificial intelligence models for prediction of the infiltration rate in the surface soil of geological formations (Case study: Alashtar watershed, Lorestan province)

Shokofeh Hasanvand ¹ , Alireza Sepahvand ^{2*} , Nasrin Beiranvand ¹ , Negar Arjmand ³ 

¹ PhD Student, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran

² Associate professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran

³ M.Sc Student, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Extended Abstract

Introduction

Water repellency is a property that commonly affects the soil surface layer. It results from hydrophobic coatings on soil particles that originate from organic matter. The most significant effect of soil water repellency is a reduction in infiltration rates. The infiltration rate is one of the primary processes of the hydrological cycle. Hydrogeological and subsurface phenomena such as infiltration and percolation mainly affect natural or man-made geotechnical soil. Understanding these processes is essential for runoff, groundwater seepage, erosion, substance transport, and evapotranspiration, which are strongly influenced by precipitation. It is the property of water by which it moves through the soil particles. The infiltration process plays a fundamental role in streamflow, groundwater recharge, subsurface flow, and surface and subsurface water quality and quantity. In addition, soil infiltration is a key factor in designing irrigation systems, managing water resources, protecting soil, and controlling erosion in watershed areas. Knowledge of the infiltration rates is also useful for calculating both natural and artificial groundwater recharge and surface runoff. Therefore, the purpose of this study was the performance assessment of artificial intelligence models for the prediction of the infiltration rate in the surface soil of geological formations in Alashtar watershed, Lorestan Province, Iran.

Materials and Methods

The study area is a part of the Kashkan watershed, Lorestan province, Iran. So, it was selected as a suitable watershed to model the infiltration rate in different vegetation types by various soft computing techniques. The study area is located between 48°10' 28" - 48°23' 29" E latitudes and 33°45' 17" - 33°51' 23" N longitudes, covering approximately 112.54 km². The elevation ranges from 1481 to 3613 meters above sea level (m.a.s.l.). The studied region has a cold and semiarid climate with mean annual rainfall of less than 570 mm. Most parts of the Alashtar watershed are rangeland, while forest, dry farming, and irrigation lands are also present in significant amounts. The surface lithology in the Alashtar watersheds is covered by the Eocene, Quaternary, Cretaceous, Miocene, Oligocene, Paleocene, and Pliocene geologic formations. A double-ring infiltrometer was used to measure the infiltration rates in surface soils of various geological formations. After collecting infiltration data, six machine learning models were employed to predict infiltration rates: Gaussian Process (GP), Classification And Regression Tree (CART), Random Forest (RF), Multivariate adaptive regression splines (MARS), M5P model tree (M5P), and Reduced Error Pruning Tree (REP Tree). The dataset included some physical characteristics of soil, and it was split into 70% for model training and 30% for testing. The model's performance was evaluated using Root Mean Square Error (RMSE), Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE), and Coefficient of Correlation (CC). To enable rapid and reliable comparisons, Taylor diagrams were also employed. The Taylor diagram displays Root Mean Square Error (RMSE), Coefficient of Correlation (CC), and standard deviation (SD) values with closer positions on the diagram indicating better model performance.

Results and Discussion

The results indicated that surface soil from OML geological formations had higher cumulative infiltration and average infiltration rates. Among the tested models, GP, CART, RF, MARS, M5P, and REP Tree, the M5P and REP Tree models, using variables such as time, sand, clay, silt, soil density, and moisture, showed the lowest prediction errors models. Specifically, the bagging M5P model performed best in both training and testing phases with CC = 0.99, RMSE = 0.009, NSE = 0.006 and CC = 0.99, RMSE = 0.009, NSE = 0.006 in each phase,

respectively). Finally, the results showed that the M5P model was particularly effective in predicting infiltration rates in the surface soil of the studied geological formations. The comparison of the results suggested that there was no statistically significant difference between conventional and soft-computing-based infiltration models. The performance of the developed models was also compared using a Taylor diagram, in which an accurate model was indicated by a reference point, with a correlation coefficient of 1 having the same amplitude of variation as the observations. Thus, M5P was identified as the most accurate model for cumulative infiltration prediction.

Conclusion

Prediction of the infiltration rate is essential for hydrologic design, watershed management, irrigation, and agricultural planning. This study evaluated several machine learning models, GP, CART, RF, MARS, M5P, and REP Tree, for their ability to predict infiltration rates using eight input variables: time, sand, clay, silt, moisture content, bulk density, porosity, and infiltration rate itself. Model performance was assessed using CC, MAE, and RMSE. Based on the evaluation results, the soft computing model possesses strong predictive capability for soil infiltration. In particular, learning algorithms like M5P can effectively estimate both infiltration and runoff in various geological formations. The findings showed that these models can be used to quantify the amount of infiltration and estimate the amount of runoff in the surface soil of geological formations. Furthermore, the results of this research can be used by the local authority to manage properly, and systematically plan development within their areas.

Keywords: Lorestan province, Kashkan watershed, Infiltration rate, Soft Computing techniques.

Article Type: Research Article

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Shokofeh Hasanvand: Data curation, software, analysis, manuscript editing; **Alireza Sepahvand:** Conceptualization, formal analysis and investigation, supervision; **Nasrin Beiranvand:** Manuscript editing, methodology; **Negar Arjmand:** Writing-original draft preparation, Resources. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

*Corresponding Author, E-mail: Sepahvand.a@lu.ac.ir

Citation: Hasanvand, S., Sepahvand, A., Beiranvand, N., & Arjmand, N. (2025). Performance assessment of the artificial intelligence models for prediction of the infiltration rate in the Surface Soil of Geological Formations. *Water and Soil Management and Modeling*, 5(2), 290-308.
doi: 10.22098/mmws.2025.16276.1520

Received: 29 November 2024, Received in revised form: 14 April 2025, Accepted: 15 April 2025, Published online: 22 June 2025.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 2, pp. 290-308.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





بررسی کارایی مدل های هوش مصنوعی برای مدل سازی ضریب نفوذپذیری در خاک سطحی سازندهای زمین شناسی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز الشتر، لرستان)

شکوفه حسنونند^۱، علیرضا سپهوند^{۲*}، نسرين بیرانوند^۱، نگار ارجمند^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

^۲ دانشیار گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

چکیده

نفوذپذیری آب در خاک نقش اساسی در جریان رودخانه، تغذیه منابع آب زیرزمینی، جریان های زیرسطحی و همچنین کیفیت و کمیت آب های زیرزمینی دارد. یکی از موارد مهم در طراحی سازه ها و پژوهش های مربوط به منابع آب و خاک، نرخ نفوذپذیری است. هدف پژوهش حاضر، بررسی کارایی مدل های هوش مصنوعی برای مدل سازی ضریب نفوذپذیری در خاک سطحی سازندهای زمین شناسی در حوزه آبخیز الشتر واقع در استان لرستان بود. به منظور اندازه گیری نفوذپذیری آب در خاک از استوانه های مضاعف استفاده شد. همچنین مدل سازی ضریب نفوذپذیری توسط الگوریتم های یادگیری ماشین شامل GP، RF، M5P، REPTree، CART، MARS، (RMSE)، ضریب همبستگی (CC) و ضریب نش-سانکلیف (NSE) مقایسه شد. نتایج مدل ها با استفاده از معیارهای سنجش ریشه میانگین مربع های خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (CC) و ضریب نش-سانکلیف (NSE) مقایسه شد. نتایج مقایسه مدل ها نشان داد که مدل M5P با مقدار معیارهای سنجش خطای CC، RMSE و NSE در مرحله آموزش به ترتیب برابر ۰/۹۶۲، ۰/۰۳۲ و ۰/۹۲۶ و در مرحله آزمایش به همین ترتیب برابر ۰/۹۸۶، ۰/۰۲۷ و ۰/۹۲۵ نسبت به مدل های GP، CART، RF، MARS و REPTree برای تخمین میزان نفوذپذیری از عملکرد بهتری برخوردار بود. در نهایت نتایج نشان داد که می توان از مدل M5P برای مدل سازی ضریب نفوذپذیری آب در خاک سطحی سازندهای مختلف زمین شناسی استفاده کرد. به طور کلی می توان الگوریتم های یادگیری را به عنوان ابزاری دقیق و قابل اعتماد معرفی کرد و مدل سازی با آن ها را به عنوان روشی نو و ابزاری قدرتمند برای صرفه جویی در هزینه و زمان برای تعیین میزان نفوذپذیری و محاسبه رواناب خروجی از منطقه پیشنهاد داد.

واژه های کلیدی: استان لرستان، حوزه آبخیز کشکان، نفوذ آب در خاک، الگوریتم های یادگیری.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Sepahvand.a@lu.ac.ir

استناد: حسنونند، شکوفه، سپهوند، علیرضا، بیرانوند، نسرين، و ارجمند، نگار (۱۴۰۴). بررسی کارایی مدل های هوش مصنوعی برای مدل سازی ضریب نفوذپذیری در خاک سطحی سازندهای زمین شناسی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز الشتر، لرستان)، *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۱)، ۳۰۸-۲۹۰. doi: 10.22098/mmws.2025.16276.1520

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۲، صفحه ۲۹۰ تا ۳۰۸.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

نفوذ آب به خاک، فرآیند اولیه ورود آب از سطح خاک به داخل بخش غیراشباع خاک است. کمی سازی پدیده نفوذ آب به خاک در مدیریت حوزه های آبخیز از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است (Mukheibir, 2008). مطابق تعریف نفوذپذیری عبارت است از مقدار ورود آب از سطح خاک به داخل آن که بر مبنای ارتفاع آب در واحد زمان (مثلاً اینچ در ساعت یا میلی لیتر در ساعت) بیان می شود (Sepahvand et al., 2018; Hasanvand et al., 2021). فرآیند نفوذ آب به خاک یکی از مهم ترین اجزای چرخه آب در طبیعت است که به سرعت تحت تأثیر عوامل مدیریتی خاک قرار دارد. نفوذ آب به خاک در مدیریت منابع آب، طراحی سازه های زهکشی و برآورد رواناب سطحی اهمیت ویژه ای دارد (Ghorbani Dashtaki et al., 2009; Qhaiumi, 2021; Mohammadi et al, 2013; Hasanvand et al, 2021). وضعیت نفوذپذیری خاک نشان دهنده چگونگی رفتار خاک در برابر آب رسیده به سطح خاک است. این پدیده تعیین کننده سرنوشت آب رسیده به سطح خاک است و مقدار تلفات بارش را مشخص می کند (Horton Robert, 1993). آگاهی از مشخصه های نفوذپذیری خاک در سازندهای زمین شناسی از جمله موارد مهم در انجام پژوهش است (Machiwal et al., 2006; Saeediyen and Moradi, 2019). همچنین دانستن سرعت نفوذ پایه در پژوهش های مربوط به آب و خاک ضروری است. بنابراین از روشی مطمئن، سریع و نسبتاً کم هزینه برای برآورد کردن میزان نفوذ نهایی استفاده می شود. برای این منظور از روابط و مدل های نفوذ استفاده می شود که کارکرد مدل های نفوذ به ویژگی های مختلف فیزیکی مثل توزیع اندازه ذرات و ساختمان از یک سو و شرایط خاک مثل مدیریت خاک و محتوای رطوبتی خاک بستگی دارد (Kavian et al., 2017; Vaezi and Salehi., 2020).

برای درک و شناخت دقیق یک پدیده یا ترکیبی از پدیده ها، امروزه مدل ها به عنوان مهم ترین ابزار در بررسی های تجربی و تکوینی، مورد توجه قرار می گیرند. یک مدل نشان دهنده ساختار و کارکرد سیستم مورد نظر است (Maria, 1997). به عبارتی دیگر، مدل ها بیانگر نوعی ابزار عملی هستند که به کمک آن ها می توان به درکی از واقعیت (البته نه کل واقعیت، بلکه بخش مفید و قابل فهم آن) دست یافت (Refahi, 2015). علاوه بر این یک مدل می تواند یک تئوری، یک قانون، یک فرضیه، یک ایده سازمان یافته و یا ترکیبی از داده ها باشد. به کمک مدل ها می توان حجم زیادی از داده ها را سازماندهی کرد و هزینه های پژوهش را کاهش داد (Refahi, 2015). در واقع مدل ها چارچوبی را فراهم می آورند که بر مبنای آن می توان اطلاعات را تعریف، جمع آوری،

تدوین، جمع بندی، پردازش و خلاصه نمود. یک مدل به هر شکلی که باشد باید حداقل یکی از ویژگی های زیر داشته باشد (Ahmadi, 2015). مدل های دسته ای در تحلیل داده های گسسته و طبقه ای، و مدل های پیش بینی با رگرسیون بیش تر روی داده های پیوسته کار می کنند (Mozaffari et al., 2015). طبقه بندی و پیش بینی، دو نوع عملیات داده کاوی برای تحلیل داده ها و استخراج مدل به منظور تعریف طبقات مهم داده ها، فهم و پیش بینی رفتار آن ها در آینده است.

در دو دهه گذشته توانایی های فنی بشر برای تولید و جمع آوری داده ها به سرعت افزایش یافته که عواملی مانند استفاده گسترده از ابزارهای کامپیوتری در علوم مختلف، همچنین پیشرفت در ابزارها و نرم افزارهای جمع آوری داده از اسکن کردن متون تا سنجش از دور ماهواره های در این تغییرات نقش مهمی ایفا کرده است. در این میان درخت تصمیم به همراه قوانین مربوط به تصمیم یکی از مشهورترین روش ها و تکنیک های دسته بندی است که در فرآیند داده کاوی مورد استفاده قرار می گیرد (Mozaffari et al., 2015) که از ابزارهای قوی و پیشرفته متداول برای تقسیم بندی و پیش بینی سری های زمانی است. در ساختار درخت تصمیم، پیش بینی حاصل شده در قالب یک سری قواعد مشخص تعریف می شوند (Mozaffari et al., 2015).

(Talebi and Akbari, 2013) به بررسی کارایی مدل درخت تصمیم گیری در برآورد رسوبات معلق رودخانه های حوضه سد ایلام پرداختند. در این پژوهش کارایی مدل های درخت تصمیم گیری در پیش بینی میزان آورد رسوبات رودخانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن ها نشان داده که به طور کلی مدل درخت تصمیم گیری در مقایسه با روش مرسوم منحنی سنجه رسوب تطابق بسیار بیشتری با مقادیر اندازه گیری شده داشته و مهم ترین عامل ایجاد درخت که هم بستگی بالایی با مقادیر رسوب داشته است، دبی متناظر با رسوب و سپس بارش های روزانه بوده است. (Sepahvand et al, 2018) به بررسی و مقایسه کارایی مدل های نفوذ پرداختند. در این پژوهش بعد از اندازه گیری نفوذ با استوانه های مضاعف به مدل سازی نفوذ با مدل هایی همچون کوستیاکوف، کوستیاکوف اصلاح شده و نول و فیلپ پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که مدل نول از کارایی بالاتری نسبت به بقیه برخوردار است. در بخش دوم پژوهش از مدل های GP، MLR و SVM برای مدل سازی نفوذ استفاده شد که نتایج این بخش حاکی از کارایی بالاتر مدل SVM-PUK نسبت به دیگر مدل ها برای پیش بینی میزان نفوذ آب بود. Sihag et al (2019) به بررسی روند نفوذ آب در خاک مناطق خشک ایران با استفاده از تکنیک های هوش مصنوعی پرداختند. آن ها در این پژوهش از مدل های سیستم نرو فازی انطباقی، مدل ماشین

مدل‌هایی هستند که تاکنون برای مدل‌سازی نفوذ آب در خاک مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. با عنایت به مباحث و سوابق ذکر شده باید اذعان نمود که دستیابی به مدلی مناسب برای نفوذ، ابزاری برای ارزیابی و بررسی و پیش‌بینی سرعت نفوذ آب در خاک و ارزیابی حساسیت خاک‌ها به تولید رواناب، فرسایش، برنامه‌ریزی و مدیریت حائز اهمیت است، همچنین با توجه به تأثیر خاک سطحی سازندها در تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی از نظر مقدار و توزیع مکانی می‌توان با انتخاب یک روش مناسب برای ارزیابی میزان آب نفوذ یافته در سازندها با صرف هزینه پایین به پژوهشگران اطلاعات مفیدی ارائه داد. لذا در این پژوهش از الگوریتم‌های یادگیری و مدل‌های رگرسیونی درخت تصمیم‌گیری MARS^{۱۰}، CART^{۱۱}، REPTree، M5P و RF استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه از نظر ژئومورفولوژیکی در بخش مرکزی رشته کوه‌های زاگرس در استان لرستان قرار دارد که خود بخشی از حوزه آبخیز کشکان است که با مساحت ۷۹۷/۶۴ کیلومتر مربع مطابق (شکل ۱) بین مختصات جغرافیایی ۳۸°۰۳'۳۸" تا ۳۸°۳۰'۵۳" طول شرقی و ۳۳°۴۴'۳۷" تا ۳۴°۰۱'۲۱" عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). حوزه آبخیز الشتر یکی از زیرحوزه‌های سرشاخه رودخانه کشکان است که به‌عنوان یکی از مناطق سیل‌خیز منطقه شناخته می‌شود و جریان‌های آب سطحی آن، در نهایت به مخزن سد کرخه وارد می‌شود. میانگین بارندگی الشتر در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ حدود ۵۷۰ میلی‌متر و بر اساس روش دومارتن، اقلیم منطقه نیمه‌خشک و سرد است.

بردار پشتیبان^۱ (SVM) و جنگل تصادفی^۲ (RF) استفاده کردند. همچنین برای اندازه‌گیری نفوذ از استوانه‌های مضاعف استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل SVM با بیش‌ترین مقدار ضریب همبستگی (CC) بهترین عملکرد را داشته است. Sihag et al (2020) به مدل‌سازی روند نفوذ با تکنیک‌های محاسبات نرم‌افزاری پرداختند. آن‌ها در این پژوهش از شبکه‌ی عصبی مصنوعی^۳ (ANN) برای تخمین میزان نفوذ خاک استفاده کردند. همچنین از یک مجموعه‌ی حاوی ۱۵۵ داده برای تهیه الگوریتم‌های مختلف و آزمایش مدل‌ها استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد با این که مدل‌های GRNN^۴، GP^۵ و GEP عملکرد تخمینی خوبی را ارائه داده‌اند اما مدل ANN با ضریب همبستگی در مراحل آموزش و آزمایش به‌ترتیب برابر ۰/۹۸ و ۰/۹۱ بهترین عملکرد را داشته است. Sepahvand et al (2021) با استفاده از مدل‌های داده‌کاوی به تخمین ضریب نفوذ پرداختند. آن‌ها در این پژوهش از مدل‌های RF، MLR^۶، NN^۷، GP و M5P^۸ استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل NN نسبت به دیگر مدل‌ها از صحت^۹ بالاتری برای تخمین ضریب نفوذ برخوردار است. Mehta et al (2024) به بررسی و تخمین میزان نفوذپذیری با استفاده از مدل‌های یادگیری پرداختند. در این پژوهش علاوه بر خصوصیات فیزیکی خاک، از برخی عناصر شیمیایی خاک برای تخمین میزان نفوذپذیری آب در خاک استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی دارای بیش‌ترین صحت، در تخمین سرعت نفوذپذیری آب در خاک است. مدل‌سازی نفوذپذیری خاک سطحی سازندهای زمین‌شناسی مختلف با استفاده از مدل‌های داده محور نظیر یادگیری ماشین و درخت تصمیم مبحث جدیدی در علوم مربوط به زمین هستند. بر همین اساس برخی از مدل‌های استفاده شده در این پژوهش از جمله

⁷ Neural Network

⁸ M5P model tree

⁹ Accuracy

¹⁰ multivariate adaptive regression splines

¹¹ Classification And Regression Tree

¹ Suport Vector Machin

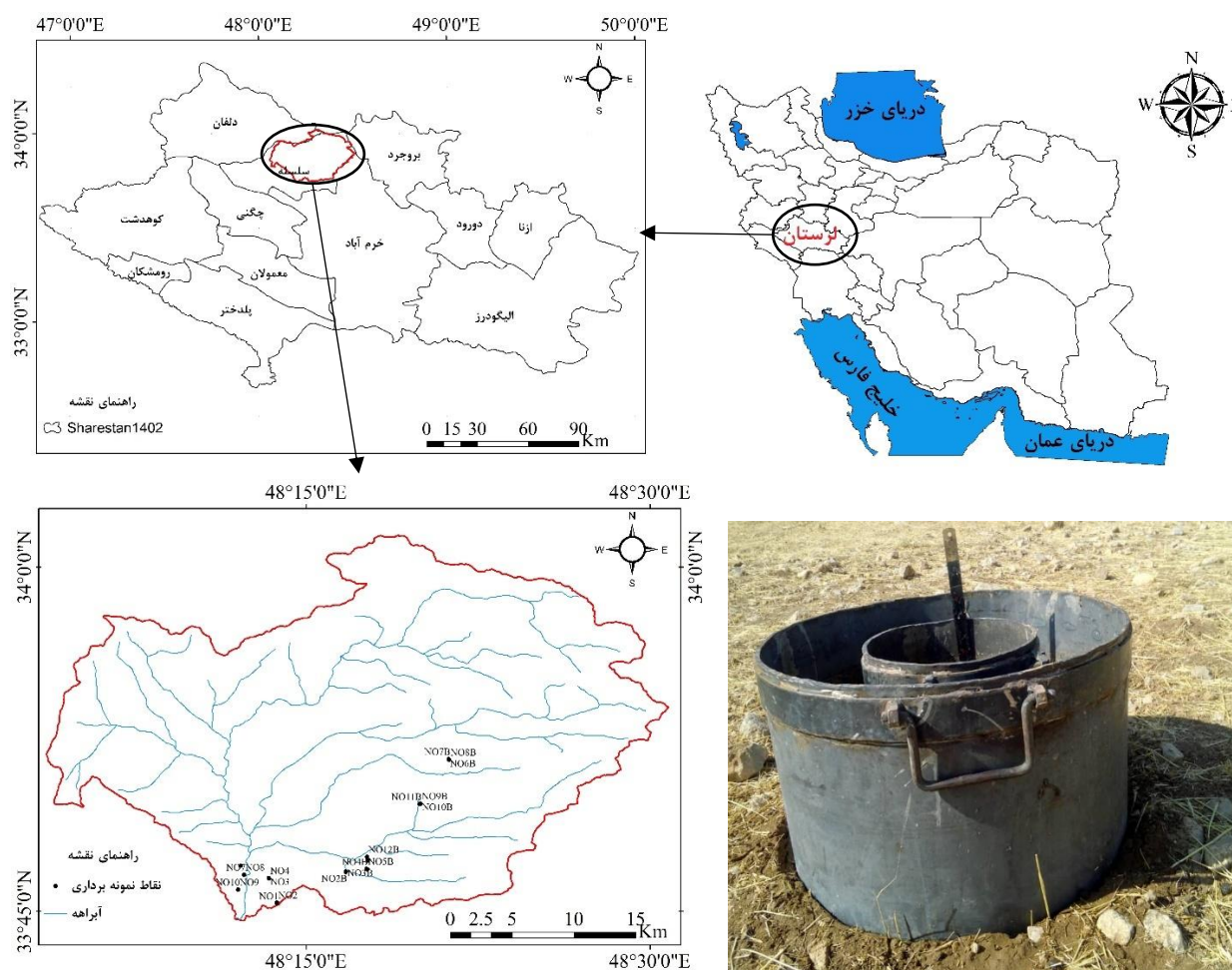
² Random Forest

³ Artificial Neural Network

⁴ Generalized Regression Neural Network

⁵ Gaussian process

⁶ multi-linear regression



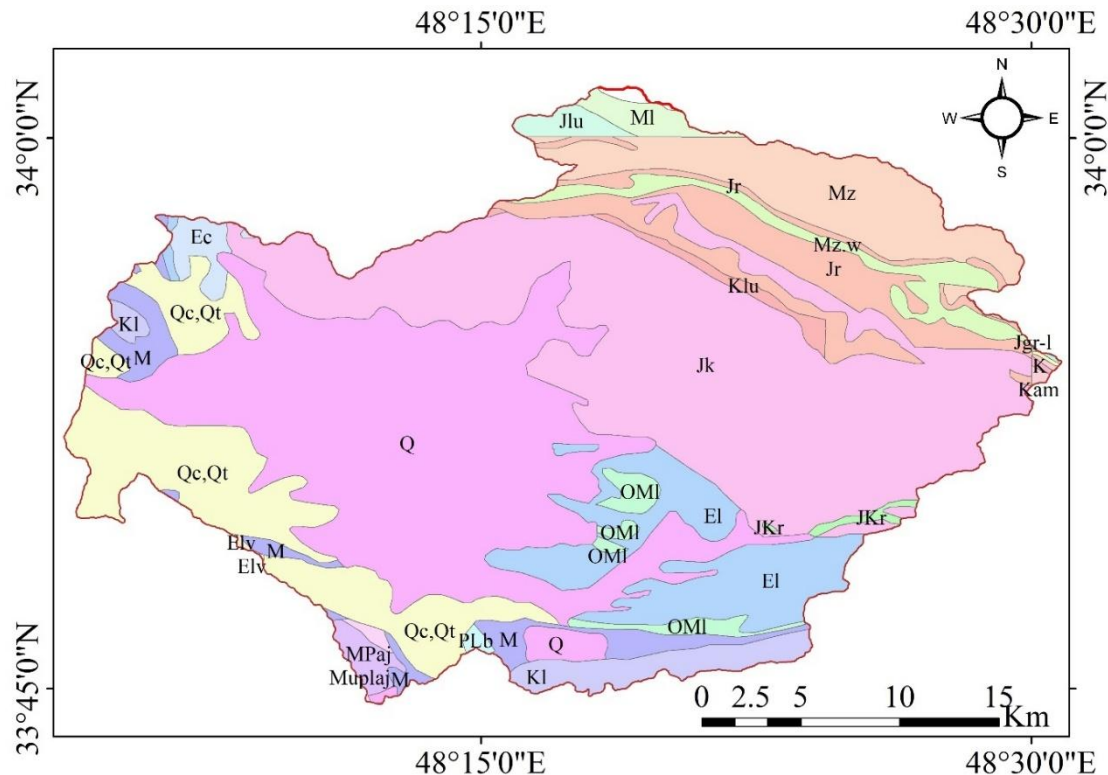
شکل ۱- استوانه‌های مضاعف اندازه‌گیری شدت نفوذپذیری و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در استان لرستان و ایران
Figure 1- The Double Ring infiltrometer and geographical location of the study area on the map of Lorestan Province and Iran

۲-۲- تهیه نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شده توسط شرکت ملی نفت ایران برای انتخاب نقاط اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری استفاده شد. ابتدا این نقشه مورد بازبینی و سپس با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی^۱ (GIS) واحدهایی با سنگ‌شناسی مشابه با همدیگر تلفیق شد که نتیجه به صورت یک نقشه زمین‌شناسی با بخش‌های تلفیقی سازندهای مختلف تهیه شد (شکل ۲). سازندهای زمین‌شناسی مساحت کم در ارتفاعات با

شیب بالا، به دلیل کم بودن ضخامت خاک، پایین بودن میزان نفوذپذیری و همچنین مشکل بودن اندازه‌گیری نفوذپذیری، از فرآیند اندازه‌گیری نفوذپذیری حذف شدند (Fox et al, 1997; Ribolzi et al, 2011; Hasanvand et al, 2021). شکل ۲ نقاط اندازه‌گیری نفوذ در نقشه زمین‌شناسی را نشان می‌دهد. جدول ۱ خصوصیات سنگ‌شناسی سازندهای زمین‌شناسی استفاده شده برای اندازه‌گیری نفوذپذیری را نشان می‌دهد.

¹ Geographic Information System



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی حوزه‌الشتر
Figure 2. Geological map of Alashtar watershed

جدول ۱- خصوصیات سنگ‌شناسی سازندهای زمین‌شناسی مورد استفاده در فرآیند اندازه‌گیری نفوذپذیری

Table 1. Characteristics of geological formations used in the infiltration measurement process

نماد	سازند	سنگ‌شناسی
El	پایده	آهک، آهک آهک‌رسی و آهک‌رس
Jk, Mz	گروه خامی	آهک سفید، آهک دولومیتی
M	گچساران	آهک‌رس، ماسه سنگ، آهک
Muplaj	آغاچاری	آهک قهوه‌ای تا خاکستری، دارای رگه‌های گچی، آهک‌رس قرمز به همراه ماسه سنگ
Mpaj	آغاچاری	آهک‌رس‌های قرمز و کنگلومرا
Plb	بختیاری	آهک‌رس و کنگلومرا
Oml	آسماری	آهک، آهک آهک‌رسی، آهک‌رس
Qt	رسوبات قدیم	کنگلومرا با عناصری از برون‌زده‌ای همان محل، آبرفت کهن و پادگانه‌های بلند
Q	رسوبات جدید	آبرفت

مناسب برای نصب استوانه‌های مضاعف و اندازه‌گیری نفوذپذیری، شیب کمتر از ۵ درصد است) انتخاب شد (شکل ۲). در ادامه سازندهایی که دارای شیب مناسب برای اندازه‌گیری نفوذ نبودند، از فرآیند اندازه‌گیری حذف شدند. بعد از مشخص شدن محل‌های نمونه‌برداری، برای اندازه‌گیری سرعت نفوذپذیری از استوانه‌های مضاعف به‌دلیل معمول بودن شیوه و تأمین اطلاعات مفید در صورت کاربرد صحیح استفاده شد (Ward and Trimble, 2004). روش اندازه‌گیری نفوذ به این صورت بود که عمق آب قابل نفوذ به خاک در زمان معین (بسته به سرعت نفوذ) به کمک دو استوانه متحدالمرکز اندازه‌گیری شد. این استوانه‌ها فلزی و

۳-۲- اندازه‌گیری نفوذ در سازندهای زمین‌شناسی منتخب منطقه

در این پژوهش برای تعیین محل‌های اندازه‌گیری نفوذ آب در خاک سطحی هر سازند زمین‌شناسی از روش نمونه‌برداری تصادفی استفاده شد (Sadeghi, 2010). انتخاب محل‌های نمونه‌برداری به این شکل بود که ابتدا نقاط نمونه‌برداری در روی نقشه به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. سپس با توجه به این‌که ممکن بود نقاط انتخاب شده دارای شیبی بوده که مناسب اندازه‌گیری نفوذ نباشند، لذا با پیمایش صحرایی و دید کارشناسی در منطقه (شهریور ماه ۱۳۹۹)، نقاطی با شیب مناسب (شیب

CART^۲: یک نمودار پیچشی شبیه درخت با تقسیمات دوتایی برای معرفی یک الگوی رده بندی و تشخیص معرفی می کند. درخت CART بازگشتی دو دویی است که گره های والدین را دقیقاً به دو گروه فرزند منشعب می کند و به طور بازگشتی منشعب کردن را تا زمانی که انشعاب دیگری نتواند ساخته شود ادامه می یابد. در تقسیم داده ها به صورت بازگشتی به زیر گروه ها، فقط دو زیر گروه را پشتیبانی می کند. این الگوریتم سریع است که هرس نمودن آن رو به عقب است (Berry and Linoff, 2004; Mirhashemi et al., 2018; Chattamvelli, 2011).

REPTree^۳: یک درخت رگرسیون تصمیم گیری است که به وسیله تقسیم و هرس کردن درخت رگرسیون، تصمیم گیری را بر اساس بالاترین اطلاعات مقدار سود تشکیل می دهد. REPTree ها درخت تصمیم گیری سریع و ساده ای هستند که بعد از ساختن یک درخت با استفاده از به دست آوردن اطلاعات معیار تقسیم، REP برای هرس درخت ایجاد شده اعمال می شود (Witten et al., 2005).

M5P^۴: شاخه های خود را به صورت دوتایی و تنها بر اساس یک متغیر ایجاد می کند، که بر اساس شرطی که در هر گره تعریف می شود، اطلاعات در آن گره به دو قسمت تقسیم می شود. در این الگوریتم از پارامتر انحراف معیار مقادیر متغیر هدف به عنوان معیار اندازه گیری خطا در هر گره، برای ایجاد شاخه در آن گره استفاده می شود. بدین صورت که صفتی که موجب کاهش بیش تر انحراف معیار در هر گره می شود، به عنوان صفت مورد نظر برای ایجاد شاخه انتخاب می شود (Zahiri et al., 2018).

RF^۵: روش های درخت پایه، روش های آماری ناپارامتری برای اجرای آنالیز طبقه بندی و تحلیل رگرسیونی با استفاده از الگوریتم افزایشی بازگشتی هستند. جنگل تصادفی متغیر ورودی زیادی را پذیرا بوده و هم چنین می تواند اهمیت نسبی هر یک از متغیرها را بررسی کرده و مهم ترین متغیر را در پیش بینی مدل شناسایی کند. این روش پتانسیل لازم را به عنوان یک مدل مکانی برای ارزیابی و پیش بینی مسائل محیط زیستی و زمینی را دارد (Norouzi Goshbalag and Nadiri, 2018; Avand et al., 2019).

GP^۶: مدل های رگرسیون فرآیند گوسی بر مبنای این فرض هستند که مشاهدات تنظیم باید دارای اطلاعاتی درباره یکدیگر باشد. این فرآیند راهی برای مشخص کردن الویی به صورت مستقیم روی فضای تابع هستند. مدل های فرآیند گوسی به دلیل دانش قبلی درباره وابستگی های تابعی و داده ها، برای تعمیم به

معمولاً استوانه بیرونی باید دارای قطری حدود ۶۰ سانتی متر و قطر استوانه میانی بین ۳۰-۳۵ سانتی متر است. ارتفاع استوانه ها معمولاً ۴۰ سانتی متر است که ۱۵-۱۰ سانتی متر آن به داخل خاک رانده می شود. به جای استوانه بیرونی می توان از انباشته شدن خاک و ساختن پشته ای به موازات استوانه میانی استفاده کرد. اندازه گیری های نفوذپذیری در زمان های مختلف از استوانه میانی صورت می گیرد. لبه این استوانه ها مثل کارد تیز می شود تا به راحتی بتوان آن ها را به حداقل به هم خوردگی خاک به داخل آن فرو برد (Alizadeh, 2019). در این پژوهش، در هر یک از سازندهای زمین شناسی مختلف، سه تکرار برداشت شد و بر اساس پایه زمانی اندازه گیری نفوذ برای نشان دادن تغییرات بهتر مقدار نفوذ در طول زمان، میزان نفوذ در زمان های ۲/۵، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ... دقیقه اندازه گیری و ثبت شد (Sepahvand et al., 2011; Sepahvand et al., 2018; Sihag et al., 2019). بر اساس نتایج به دست آمده، پایه زمانی ۷۰ دقیقه با توجه به مدت زمان ثابت شدن سرعت نفوذ در خاک سطحی سازندهای مختلف انتخاب شد و نمودارهای تغییرات سرعت نفوذ نسبت به زمان در آن ها ترسیم شد.

۲-۴- مدل سازی نفوذپذیری سازندهای زمین شناسی

روش های مختلفی برای مدل سازی نفوذ آب در خاک وجود دارد. در این پژوهش از روش های مختلف یادگیری ماشین استفاده شده است. مدل های یادگیری به لحاظ به کارگیری الگوریتم های تخمین و توزیع، طبیعت داده محور و تکرار بالای فرآیند مدل سازی، توانایی بالایی در شناسایی رفتار وقوع پدیده مورد نظر داشته و در پژوهش های علمی زیادی برتری خود را نسبت به دیگر مدل های آماری دو متغیره و چند متغیره اثبات نموده اند (Lee et al., 2013; Trigila et al., 2013; Kornejadi and Pourghasemi, 2015). در این پژوهش از مدل های CART، MARS، REPTree، M5P و RF استفاده شده است. MARS^۱: یک روش رگرسیون غیرخطی و غیرپارامتریک است که پاسخ غیرخطی بین ورودی ها و خروجی های یک سیستم را به وسیله مجموعه ای از شاخه های کوچک خطی مجزا مدل می کند. این مدل می تواند روابط غیرخطی را به طور جستجوی خودکار تعاملات بین متغیرها را شبیه سازی کند. مدل MARS توابع پایه را به وسیله جستجوی گام به گام ایجاد می کند و از یک الگوریتم تطبیقی برای انتخاب محل گره ها استفاده می کند (Bakhtiari et al., 2017).

^۱ الگوریتم رگرسیون چند متغیره خطی تطبیقی

^۲ مدل درخت طبقه بندی رگرسیون

^۳ درخت هرس شده با خطای کم

^۴ پیش بینی برآورد متغیرهای عددی پیوسته

^۵ مدل جنگل تصادفی

^۶ مدل فرآیند گوسی

تا ۳ به آن‌ها اشاره شده است. مقدار ضریب NSE بین یک تا منفی بی نهایت تغییر می‌کند. مقدار بهینه این شاخص یک است. اگر میزان آن از ۰/۵ بیش‌تر باشد، مدل شبیه‌سازی خوبی داشته است و در صورت منفی شدن آن بهتر است که به نتایج مدل بسنده نشود و از متوسط مقادیر مشاهده‌ای استفاده شود. ریشه میانگین مربعات خطا نشان‌دهنده اختلاف کلی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر تخمینی بوده و میانگین کامل انحراف و درصد خطای نسبی در حالت بهینه یا حالتی که مقادیر برآورده شده و اندازه‌گیری شده مساوی باشند برابر با صفر و مقدار کارایی یا راندمان مدل در این حالت به یک نزدیک می‌شود. مقدار ضریب همبستگی و ضریب کارایی مدل نیز نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها است و از منفی بی نهایت در بدترین حالت، تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها تغییر می‌کند. از بین مدل‌های مذکور مدلی که از ضریب همبستگی و ضریب نش-ساتکلیف بالاتر و ریشه میانگین مربعات خطا نزدیک به صفر برخوردار باشد، به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای تعیین ضرایب نفوذ در خاک سطحی سازندهای زمین‌شناسی مورد نظر انتخاب می‌شود.

$$CC = \frac{n \sum O_i P_i - (\sum O_i)(\sum P_i)}{\sqrt{n(\sum O_i^2) - (\sum O_i)^2} \sqrt{n(\sum P_i^2) - (\sum P_i)^2}} \quad (1)$$

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (3)$$

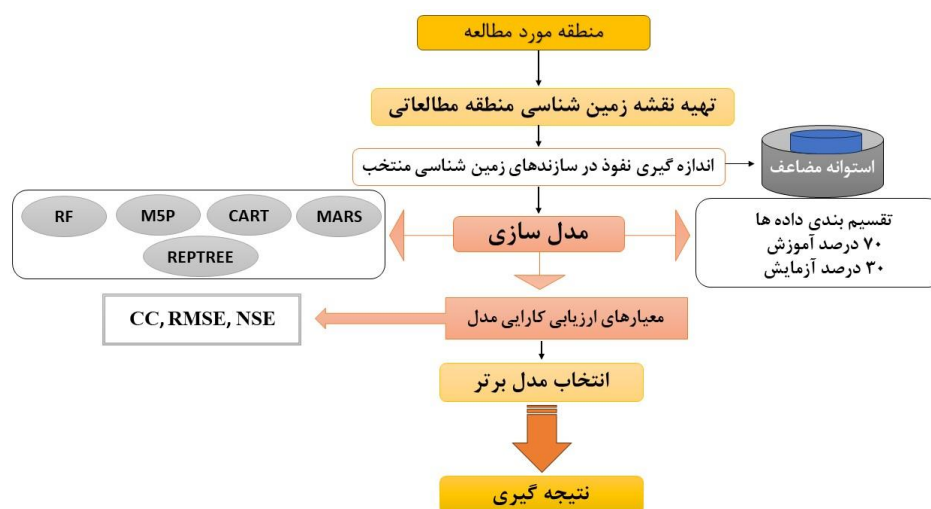
P_i مقدار برآورد شده، O_i مقدار مشاهده شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهده شده و N تعداد داده‌های اندازه‌گیری نفوذ. شکل ۳ نمودار جریان‌ی مراحل پژوهش را نشان می‌دهد.

هیچ فرآیند اعتبارسنجی نیاز ندارند و قادر به درک توزیع پیش‌بینی متناظر با ورودی آزمون‌ها هستند. فرآیند گوسی تعمیمی از توزیع گوسی است. توزیع گوسی در واقع توزیع بین متغیرهای تصادفی بوده، درحالی که فرآیند گوسی بیانگر توزیع بین توابع است (Pal and Deswal, 2010; Yang et al., 2018).

برای مدل‌سازی میزان نفوذ آب در خاک، از داده‌های نمونه‌برداری شده در عرصه استفاده شد. داده‌های استفاده شده برای مدل‌سازی در این پژوهش شامل دو گروه داده‌های ورودی و داده‌های خروجی هستند که این داده‌ها شامل برخی پارامترهای ثابت و متغیر هستند. داده‌های ورودی در این پژوهش شامل، زمان، درصد رس، درصد شن، درصد سیلت، وزن مخصوص، درصد رطوبت، و داده‌های خروجی شامل مقادیر نفوذپذیری است. به‌طور خلاصه در این پژوهش روش کار برای آموزش و آزمایش مدل به این صورت بود که داده‌های موجود به‌طور تصادفی به ۲ دسته (۷۰ درصد داده‌ها به‌منظور آموزش و ۳۰ درصد برای آزمایش مدل) تقسیم‌بندی شدند و در ابتدا مرحله آموزش مدل انجام شد و بعد از تعیین توابع بهینه و یادگیری مدل با صحت بالا، مرحله آزمایش مدل انجام گرفت. در ادامه از معیارهای سنجش خطا برای مقایسه مدل‌ها استفاده شد که در نهایت بهترین مدل با بیش‌ترین صحت برای اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری تعیین شد.

۲-۵- معیارهای سنجش خطا

به‌منظور ارزیابی کارایی مدل‌های به‌کار رفته در این پژوهش از پارامترهای ضریب همبستگی، ضریب نش-ساتکلیف و ریشه میانگین مربعات خطا استفاده شده است که به‌ترتیب در رابطه ۱



شکل ۳- نمودار جریان‌ی مراحل پژوهش

Figure 3 - Flowchart of research

۳- نتایج و بحث

جدول ۲ نتایج مربوط به خصوصیات نفوذ اندازه گیری شده در خاک سطحی سازندهای زمین شناسی را نشان می دهد. مطابق نتایج جدول ۲، تفاوت معنی دار بین میزان نفوذ تجمعی، حداکثر سرعت نفوذ، متوسط سرعت نفوذ، سرعت نفوذ نهایی در خاک سطحی سازندهای زمین شناسی مختلف دیده شد ($p < 0.01$). تفاوت معنی داری بین میزان زمان تا لحظه رسیدن به نفوذ پایه و شیب کاهش نفوذ در سازندهای زمین شناسی مشاهده نشد ($p > 0.05$). همچنین نتایج جدول ۲ نشان می دهد که بیشترین و کمترین نفوذ تجمعی به ترتیب مربوط به خاک سطحی سازندهای Oml و Mpaj با میزان ۳۰/۶۵ و ۴/۶ سانتی متر در ۶۰ دقیقه است. همچنین خاک سطحی سازندهای Q و Qt، به ترتیب با میزان نفوذ تجمعی ۲۱/۸۵ و ۲۱/۲۲ سانتی متر در ۶۰ دقیقه، در رتبه دوم و سوم قرار دارند. حداکثر سرعت نفوذ با میزان ۷۵/۶ سانتی متر بر ساعت مربوط به خاک سطحی سازند Qt و حداقل سرعت نفوذ با میزان ۲۲/۸ سانتی متر بر ساعت مربوط به خاک سطحی سازند Plb است.

بیشترین و کمترین سرعت متوسط نفوذپذیری به ترتیب متعلق به سازند Oml و سازند Mpaj با میزان ۳۰/۶۵ و ۴/۶ سانتی متر در ساعت است که این تفاوت می تواند حجم وسیعی از آب را به داخل خاک نفوذ دهد یا بر روی سطح خاک به شکل رواناب رها سازد. سازند Qt با میزان ۲۱/۲۲ سانتی متر در ساعت در رتبه دوم بیشترین مقدار نفوذ متوسط قرار گرفت. در ادامه پارامتر سرعت نفوذ نهایی مورد محاسبه قرار گرفت که مطابق محاسبات انجام شده، بیشترین مقدار سرعت نفوذ نهایی با میزان ۲۶/۴ سانتی متر بر ساعت مربوط به خاک سطحی سازند Oml است و کمترین میزان آن مربوط به خاک سطحی سازند Mpaj با میزان ۳ سانتی متر بر ساعت است. در بخش محاسبه متوسط شیب کاهش نفوذ، نتایج نشان داد که حداکثر و حداقل شیب کاهش نفوذ به ترتیب در خاک سطحی سازندهای Qt و M مشاهده شد. در ادامه زمان تا لحظه تثبیت نفوذ برای تمامی حالتها محاسبه شد که نتایج حاکی از طولانی ترین زمان برای خاک سطحی سازند M با میزان یک ساعت است. در حالی است که کوتاه ترین زمان تا لحظه تثبیت نفوذ، متعلق به خاک سطحی سازندهای Mpaj و Plb با میزان ۳۰ دقیقه است.

جدول ۲- ویژگی های ضریب نفوذپذیری اندازه گیری شده در خاک سطحی سازندهای مختلف زمین شناسی

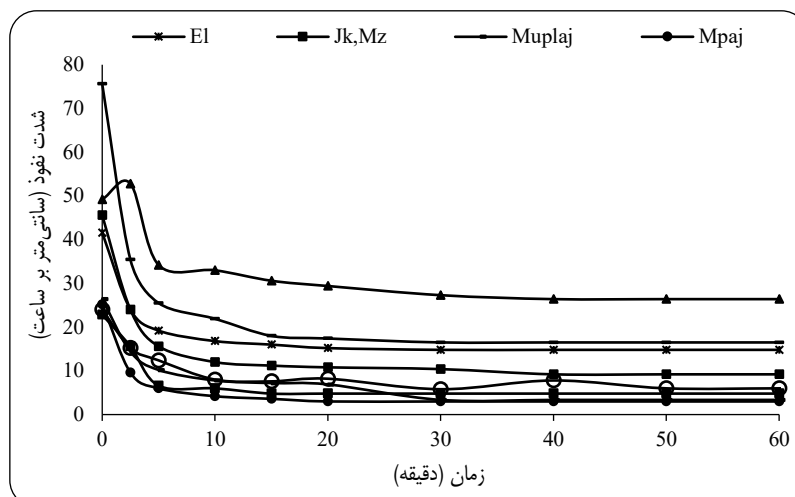
Table 2. Characteristics of infiltration coefficient measured in surface soil of different geological formations

سازند ها	نفوذ تجمعی (سانتی متر) تا زمان ۶۰ دقیقه	حداکثر سرعت نفوذ (سانتی متر بر ساعت)	متوسط سرعت نفوذ (سانتی متر بر ساعت)	سرعت نفوذ نهایی (سانتی متر بر ساعت)	زمان تا لحظه تثبیت نفوذ (ساعت)	شیب کاهش نفوذ (سانتی متر بر مجذور ساعت)
El	17±5.34 ^{bc}	41.6±1.38 ^{bcd}	17±4.33 ^{cd}	14.8±9.81 ^{bcd}	0.66±0.05 ^{cd}	40.2±10.66 ^d
Jk,Mz	12.73±1.25 ^{bcd}	45.6±21.33 ^{bc}	12.73±8.03 ^{cd}	9.2±6.6 ^{cd}	0.83±0.17 ^{cd}	43.68±30.35 ^d
M	9.6±2.76 ^{cd}	24±9.6 ^{cd}	9.6±3.7 ^d	6±2.4 ^{cd}	1±0.20 ^{cd}	18±11.98 ^d
Muplaj	6.63±1.96 ^{cd}	26.4±9.6 ^{cd}	6.63±1.3 ^d	3.36±2.6 ^d	0.66±0.17 ^{cd}	34.56±43.2 ^d
Mpaj(Ma)	4.6±1.7 ^d	25.2±36.2 ^{cd}	4.6±1.2 ^d	3±0.6 ^d	0.5±0.08 ^{cd}	44.4±42.62 ^d
Plb	6.25±1.2 ^{cd}	22.8±6.0 ^d	6.25±0.6 ^d	4.8±1.2 ^{cd}	0.5±0.04 ^d	36±16.02 ^d
Oml	30.65±10.0 ^a	52.8±0.6 ^{ab}	30.65±11.35 ^a	26.4±12.0 ^b	0.83±0 ^c	31.68±41.75 ^d
Qt,Q	21.22±6.25 ^{ab}	75.6±15.35 ^a	21.22±9.83 ^{bc}	16.5±9.05 ^{bc}	0.83±0.12 ^{cd}	70.92±88.95 ^c

*حروف متفاوت نشان دهنده اختلاف معنی دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای هر فاکتور در بین سازندهای مختلف است.

شکل ۴ تغییرات سرعت نفوذ نسبت به زمان در خاک سطحی سازندهای زمین شناسی مختلف را نشان می دهد. نتایج این شکل

به خوبی تغییرات میزان سرعت نفوذپذیری را در خاک سطحی سازندهای زمین شناسی مختلف را نشان می دهد.



شکل ۴- روند تغییرات سرعت نفوذ در خاک سطحی سازندهای مختلف زمین شناسی

Figure 4. The trend of changes in infiltration rate in the surface soil of different geological formations

تخلخل شده است، همچنین رس و سیلت نیز به عنوان یک عامل افزایش دهنده نفوذپذیری عمل کرده‌اند. علاوه بر این رس کلویید مهمی در تشکیل شدن خاک دانه‌ها و شکل‌دهی ساختمان خاک بوده و باعث تشکیل شدن ساختمان خاک مناسب‌تری شده است و در نتیجه باعث شده است که نفوذپذیری افزایش یابد. پژوهشگران نشان داده‌اند که بافت خاک به‌دورت نفوذ آب به خاک را تنظیم می‌کند، و هدایت آبی خاک بیش‌تر وابسته به ویژگی‌های ساختمانی آن است (Yimer et al, 2008; Osuji et al, 2010; Fischer et al, 2015). با این حال بافت خاک اغلب بر ویژگی‌های ساختمانی خاک تأثیر می‌گذارد و از این رو اثرهای غیرمستقیمی بر نفوذ آب به خاک دارد (Kocev et al., 2009). از دلایل دیگر سرعت بالای نفوذ می‌توان به درصد بالای رطوبت اشاره نمود. بسته به محتوای رطوبت خاک، ویژگی‌های مختلف پدیده نفوذ مانند سرعت لحظه‌ای، نفوذ تجمعی، متوسط سرعت نفوذ، نفوذ نهایی و همچنین زمان تا تثبیت نفوذ تغییر می‌یابد (Sepavand et al., 2011). رطوبت اولیه خاک عامل مهمی در تعیین سرعت نفوذ و مقدار عمقی است که جبهه رطوبتی تا آن عمق در نیم‌رخ خاک پیشروی می‌کند. به‌طوری که هرچه رطوبت اولیه خاک کمتر باشد، شیب هیدرولیکی بیش‌تر و ظرفیت خاک برای ذخیره آب بیش‌تر خواهد بود و در نتیجه سرعت نفوذ افزایش پیدا خواهد کرد. لازم به ذکر است که اختلاف میانگین زمان در بخش آموزش و آزمایش تأثیری بر نتایج مدل‌سازی نداشت.

در ادامه برای مدل‌سازی و تخمین میزان نفوذپذیری خاک سطحی سازندهای مختلف زمین‌شناسی از مدل‌های یادگیری ماشین M5P, REPTree, CART, MARS و RF استفاده شد. در این پژوهش شش پارامتر ورودی، زمان (T) بر حسب دقیقه، درصد رطوبت (W)، درصد رس (C)، درصد سیلت (Si)، درصد شن (Sa) و وزن مخصوص ظاهری (B) برحسب گرم در سانتی‌متر مکعب، استفاده شد و نرخ نفوذپذیری، بر حسب سانتی‌متر بر دقیقه به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شد.

جدول ۳ ویژگی‌های مجموعه داده‌های مرحله آموزش و آزمایش را ارائه می‌دهد. مطابق نتایج این جدول، در مرحله آموزش مشخص شد که در سازند آبرفتی با میزان شن ۵۹/۴ درصد، مقدار رس ۳۵/۵۵ درصد، مقدار سیلت ۵۴/۳۳ درصد، مقدار رطوبت ۲۰/۴ درصد و وزن مخصوص ۱/۸۷ گرم در سانتی‌متر مکعب، حداکثر سرعت نفوذ با مقدار ۱/۲۶ سانتی‌متر بر دقیقه مشاهده شد. همچنین در کنگلومرای بختیاری با میزان شن ۲۶ درصد، مقدار رس ۷/۶۲ درصد، مقدار سیلت ۳۱/۹۸ درصد، مقدار رطوبت ۱/۲۸ درصد و وزن مخصوص ۱/۳۱ گرم در سانتی‌متر مکعب، حداقل سرعت نفوذ با مقدار ۰/۳۸ سانتی‌متر بر دقیقه مشاهده شد. همچنین در مرحله آزمایش مشخص شد حداکثر سرعت نفوذ با مقدار ۰/۴۶ سانتی‌متر بر دقیقه مربوط به سازند آبرفتی هستند. علاوه بر این حداقل سرعت نفوذ با مقدار ۰/۰۵ سانتی‌متر بر دقیقه در سازند آغاچاری مشاهده شد. به‌نظر می‌رسد درصد بالای شن موجب افزایش خلل و فرج و در نتیجه افزایش

جدول ۳- خصوصیات آماری داده‌های مرحله آموزش و مرحله آزمایش

Table 3. Statistical characteristics of the data of the training and testing phases

آموزش							پارامتر
سرعت نفوذ (سانتی متر بر دقیقه)	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)	رطوبت (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	شن (درصد)	زمان (دقیقه)	
0.38	1.31	1.28	31.98	7.62	26	0	حداقل
1.26	1.87	20.4	54.33	35.55	59.4	30	حداکثر
0.65	1.51	4.13	40.02	14.35	45.56	11.79	میانگین
0.26	0.17	6.22	7.8	8.59	11.5	9.97	انحراف معیار
آزمایش							پارامتر
سرعت نفوذ (سانتی متر بر دقیقه)	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)	رطوبت (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	شن (درصد)	زمان (دقیقه)	
0.05	1.31	1.28	31.98	7.63	26	40	حداقل
0.46	1.87	20.41	54.33	35.55	59.4	70	حداکثر
0.17	1.51	4.78	39.77	14.4	45.77	50.8	میانگین
0.13	0.18	6.97	7.83	8.51	11.45	9.09	انحراف معیار

ضریب همبستگی بالا و همچنین میزان خطای پایین در مراحل آزمایش و آموزش به عنوان مدل های برتر شناخته شدند. همچنین قابل ذکر است که ضریب همبستگی و RMSE در مدل های REPTree و M5P بسیار نزدیک به هم است که می تواند نشان دهنده نتایج بسیار نزدیک این دو مدل است. Sepahvand et al, (2021) در پژوهش خود دریافتند که مدل های RF، NN و M5p دارای کارایی بالایی بودند که در مورد نتایج مدل M5P و RF هم خوانی دارد، اما با نتایج (Soleimani et al, 2022) که مدل RF مدل برتر معرفی شده است هم خوانی ندارد. مدل Gp_RBF با مقدار RMSE ۳۴/۳۷، به دلیل اینکه دارای میزان خطای زیادی در داده های آزمایش است بنابراین در این مدل ارتباط خوبی بین ورودی و خروجی مدل برقرار نشده است و به عنوان ضعیف تری مدل برای تخمین ضریب نفوذپذیری انتخاب شد. Sepahvand et al, (2018) در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که مدل GP-RBF دارای بهترین کارایی است که با نتایج این پژوهش هم خوانی ندارد زیرا در این پژوهش مدل GP-RBF به عنوان یکی از بدترین مدل ها انتخاب شد.

جدول ۴ نتایج حاصل از ارزیابی مدل ها در تخمین میزان نفوذپذیری خاک سطحی سازندهای مختلف را نشان می دهد. مطابق نتایج این جدول مدل M5P در مرحله آموزش با ضریب همبستگی ۰/۹۶، نش-ساتکلیف ۰/۹۲ و ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۰۳ و در مرحله آزمایش به همین ترتیب برابر ۰/۹۸، ۰/۹۲ و ۰/۰۲، بهترین عملکرد در تخمین میزان نفوذپذیری خاک سطحی سازندها را ارائه داد. همچنین مدل GP-RBF در مرحله آموزش با ضریب همبستگی ۰/۹۳، نش-ساتکلیف صفر و ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۰۸ و در مرحله آزمایش به ترتیب ۰/۴۱، ۰/۹۹ و ۳۴/۳۷، به عنوان ضعیف ترین مدل در برآورد نفوذپذیری خاک سطحی سازندهای مختلف زمین شناسی انتخاب شد. مدل M5P با مقدار ضریب تبیین و ضریب نش بالا و میزان خطای پایین در مراحل آموزش و آزمایش به عنوان بهترین مدل انتخاب شد زیرا هرچه میزان ضرایب همبستگی و نش بالا باشد و میزان خطای مدل پایین باشد، صحت نتایج مدل بالاتر است. پس از آن به ترتیب مدل های REPTree و RF با داشتن ضریب نش و

جدول ۴- معیارهای سنجش خطا برای مدل های مختلف در خاک سطحی سازندهای زمین شناسی

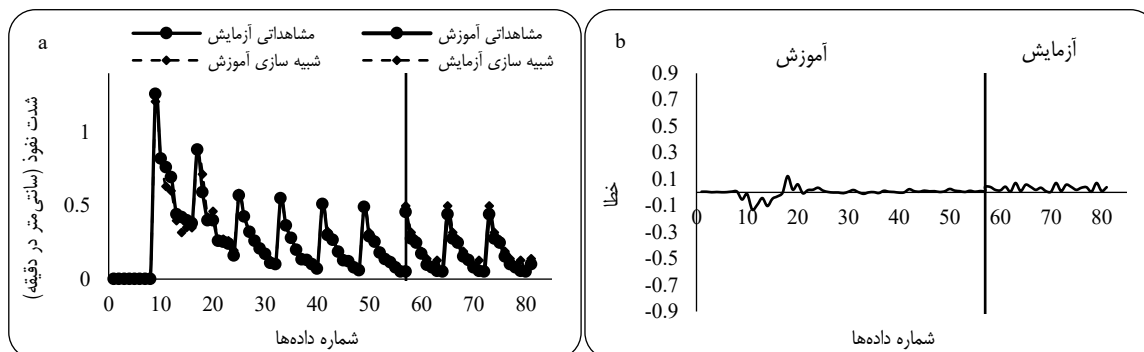
Table 4. Error evaluation metrics for different models in surface soil of geological formations

Validation			Training			Model
NSE	RMSE	CC	NSE	RMSE	CC	
0.908	0.038	0.988	0.981	0.064	0.975	RF
0.429	0.097	0.865	0.998	0.009	0.999	Gp_PUK
70.99	34.37	0.41	0	0.089	0.937	Gp_RBF
0.966	0.028	0.984	0.929	0.036	0.964	REPTree
0.925	0.027	0.986	0.926	0.032	0.962	M5P
0.398	0.087	0.84	0.78	0.07	0.888	CART

0.398	0.085	0.86	0.924	0.1	0.967	MARS
-------	-------	------	-------	-----	-------	------

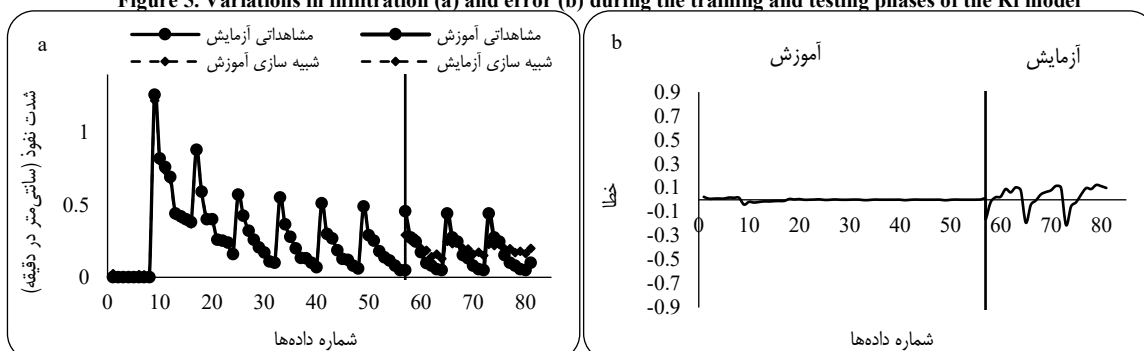
آموزش را نشان می‌دهد که تایید کننده نتایج ارزیابی مدل‌ها است و مطابق آن مدل GP-RBF دارای کم‌ترین صحت است. اما بقیه مدل‌ها تقریباً توانایی خوبی برای تخمین نفوذپذیری داشته‌اند که در بین مدل‌های استفاده شده، مدل M5P دارای بیش‌ترین صحت در تخمین میزان نفوذپذیری بوده است.

شکل‌های ۵ تا ۱۱ (a) نتایج تغییرات میزان نسبت نفوذ را برای مدل‌های RF، GP-PUK، GP-RBF، ReepTree، M5P، CART و MARS و همچنین شکل‌های ۵ تا ۱۱ (b) تغییرات خطای این مدل‌ها را نشان می‌دهد. نتایج این شکل‌ها به‌خوبی تغییرات میزان سرعت نفوذ را در هر یک از مدل‌های مختلف نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱۲ نمودار تیلور در مرحله



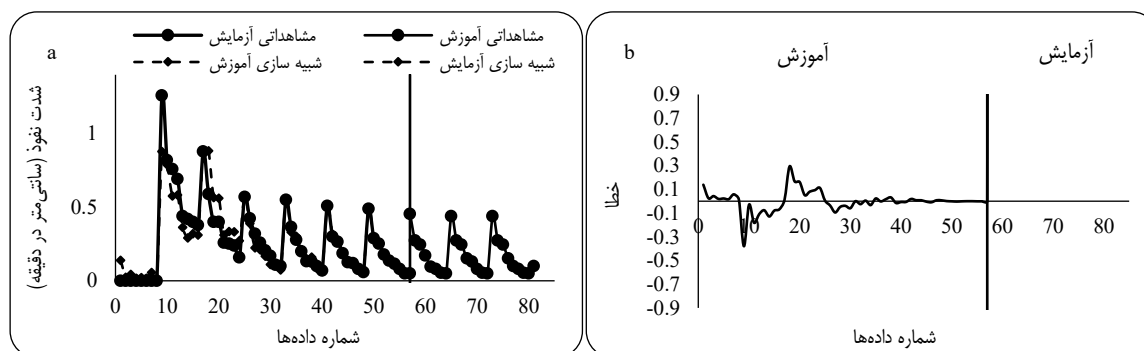
شکل ۵- تغییرات نفوذپذیری (a) و خطا (b) در مرحله آموزش و آزمایش مدل Rf

Figure 5. Variations in infiltration (a) and error (b) during the training and testing phases of the Rf model



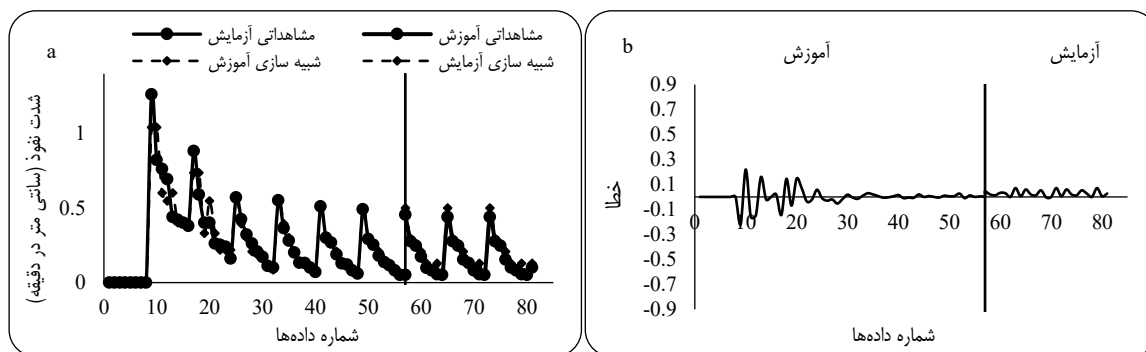
شکل ۶- تغییرات نفوذپذیری (a) و خطا (b) در مرحله آموزش و آزمایش مدل GP PUK

Figure 6. Variations in infiltration (a) and error (b) during the training and testing phases of the GP PUK model



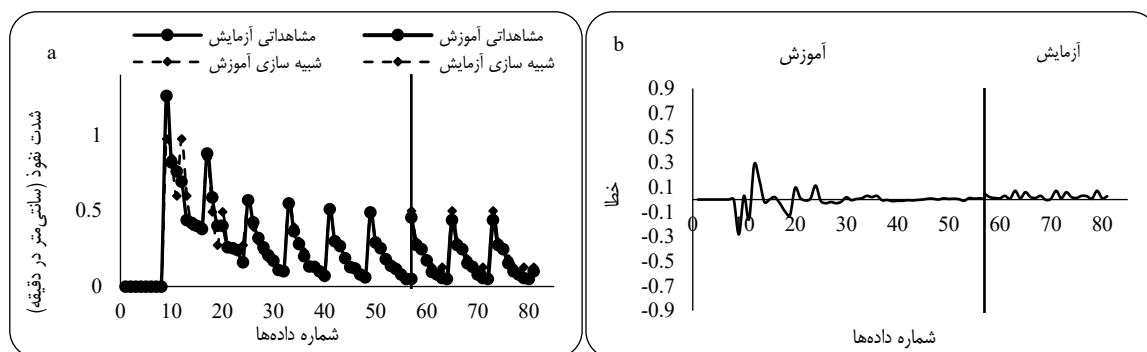
شکل ۷- تغییرات نفوذپذیری (a) و خطا (b) در مرحله آموزش و آزمایش مدل GP RBF

Figure 7. Variations in infiltration (a) and error (b) during the training and testing phases of the GP RBF model



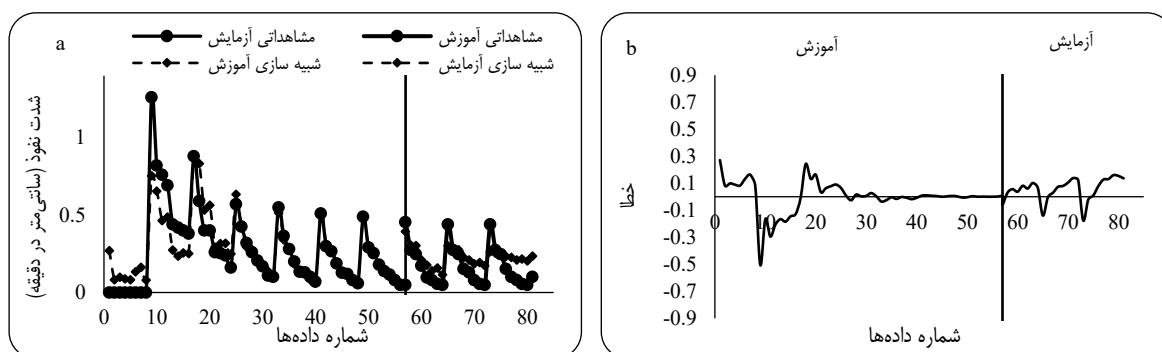
شکل ۸- تغییرات نفوذپذیری (a) و خطا (b) در مرحله آموزش و آزمایش مدل REPTree

Figure 8. Variations in infiltration (a) and error (b) during the training and testing phases of the REPTree model



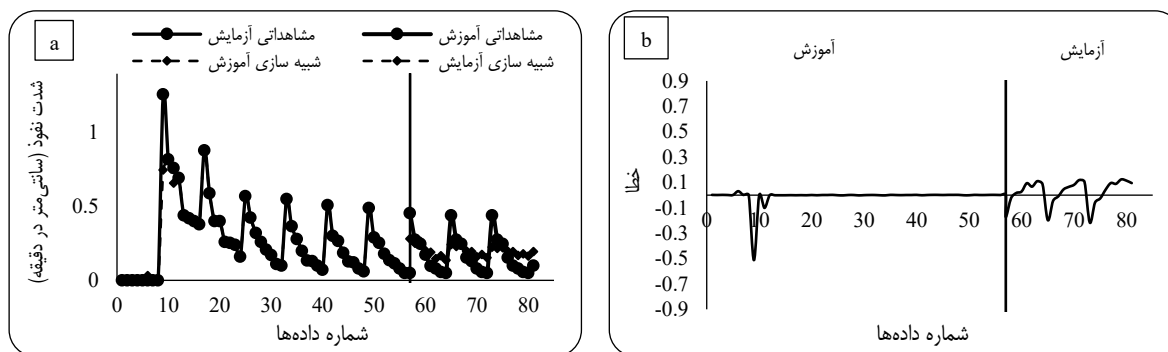
شکل ۹- تغییرات نفوذپذیری (a) و خطا (b) در مرحله آموزش و آزمایش مدل MSP

Figure 9. Variations in infiltration (a) and error (b) during the training and testing phases of the MSP model



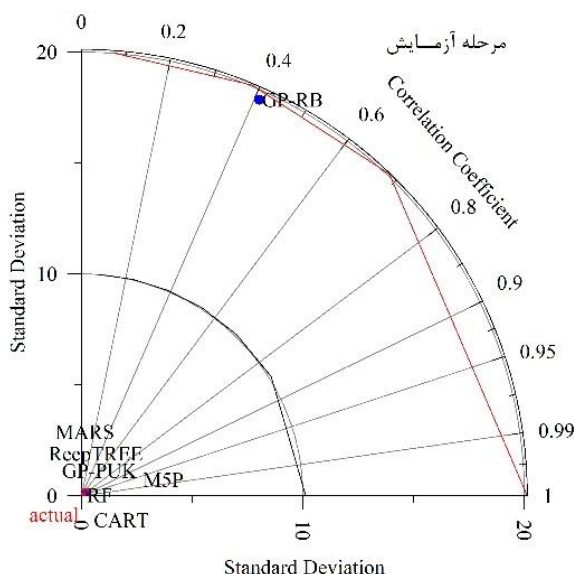
شکل ۱۰- تغییرات نفوذپذیری (a) و خطا (b) در مرحله آموزش و آزمایش مدل CART

Figure 10. Variations in infiltration (a) and error (b) during the training and testing phases of the CART model



شکل ۱۱ تغییرات نفوذپذیری (a) و خطا (b) در مرحله آموزش و آزمایش مدل MARS

Figure 11. Variations in infiltration (a) and error (b) during the training and testing phases of the MARS model



شکل ۱۲- نمودار تیلور در مرحله آزمایش مدل‌ها
Figure 12 Taylor diagram of model performance

نفوذپذیری خاک، یک امر ضروری و مهم در طراحی‌های هیدرولوژیکی، آبخیزداری، آبیاری و مطالعات کشاورزی بوده و از سوی دیگر میزان نفوذ آب به خاک، مهم‌ترین منبع تامین کننده آب برای حیات گیاهان است که نقش اساسی در کنترل آب‌های سطحی و زیرزمینی دارد. لذا دستیابی به مدل بهینه‌ای که بتواند با صحت قابل قبولی، به تخمین میزان نفوذپذیری خاک بپردازد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و وسیله و ابزاری برای ارزیابی مشکلات محیطی و کشاورزی هستند (Soleimani et al., 2022). روش‌های داده‌کاوی برای مجموعه داده‌های بزرگ با متغیرهای زیاد ساخته شده‌اند، بنابراین متفاوت از روش‌های آماری قدیمی هستند که برای مجموعه داده‌های کوچک با متغیرهای اندک طراحی شده‌اند. روش‌های بر مبنای درخت یکی از تکنیک‌های داده‌کاوی است که در این روش‌ها خروجی به صورت یک مدل با سازه درختی با استفاده از داده‌های ورودی و خروجی است (Sattari and Nahrin, 2012). از جمله پژوهش‌های بین المللی و داخلی صورت گرفته بر روی کارایی درخت تصمیم در زمینه علوم طبیعی می‌توان به مطالعات Mahesh & Mather (2003); Bahremand et al. (2007); Rusjan & Micos, (2013); Talebi & Akbari, (2008) اشاره نمود. بر این اساس هدف انجام این پژوهش مدل‌سازی میزان نفوذپذیری خاک سطحی سازندهای مختلف زمین‌شناسی حوزه آبخیز الشتر در استان لرستان انجام شد. در این پژوهش مدل M5P با مقدار ضریب تبیین و ضریب نش بالا و میزان خطای پایین در مراحل آموزش و آزمایش به عنوان بهترین مدل انتخاب شد و مدل GP-RBF به عنوان یکی از بدترین مدل‌ها انتخاب شد. مدل‌های RF_PUK و MARS اگر چه دارای ضریب همبستگی بالا در

جدول ۵ تحلیل واریانس (ANOVA) یک طرفه بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده نسبت نفوذپذیری را برای هر مدل نشان می‌دهد. مطابق نتایج این جدول و بر اساس میزان P-value مشخص شد که اختلاف نتایج تخمین ضریب نفوذپذیری مدل‌های GP_PUK، REPTree، M5، CART و MARS با مقادیر مشاهداتی معنی‌دار نیست و فقط این ارتباط برای نتایج مدل GP-RBF معنی‌دار است.

جدول ۵- تحلیل واریانس ANOVA یکطرفه بین مقادیر

مشاهداتی و پیش‌بینی شده نفوذپذیری برای مدل‌ها

Table 5. One-way ANOVA analysis of variance between observed and predicted values of infiltration for models

مدل‌ها	P-value	تفاوت مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی
Rf	0.76	ns
Gp_PUK	0.8	ns
GP-RBF	0.0	**
REPTree	0.78	ns
M5P	0.79	ns
CART	0.6	ns
MARS	0.97	ns

ns عدم معنی‌داری ** معنی‌داری

۴- نتیجه‌گیری

فرآیند نفوذ آب به خاک به عنوان ورود اولیه آب از سطح خاک به داخل بخش غیر اشباع خاک است. این فرآیند یکی از اجزای اصلی چرخه هیدرولوژی است. کمی کردن پدیده نفوذ آب به خاک در مدیریت حوزه‌های آبخیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا مهم‌ترین ویژگی خاک از لحاظ ذخیره نزولات و همچنین کشاورزی پدیده نفوذ است. به همین دلیل پیش‌بینی میزان

مرحله آموزش بودند اما ضریب همبستگی و نش آن‌ها در مرحله آزمایش نسبت به سایر مدل‌های برگزیده پایین‌تر بود. هم‌چنین نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) یکطرفه بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده نسبت نفوذپذیری برای نتایج مدل‌های GP، PUK، REPTree، M5P، CART و MARS نشان داد که اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و تخمین معنی‌دار نیست و فقط این ارتباط برای نتایج مدل GP_RBF در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار بود که نشان از نتیجه ضعیف این مدل داشت. لذا می‌توان از مدل‌های بهینه این پژوهش برای کمی‌سازی مقدار نفوذ و تخمین میزان رواناب در سازندهای مختلف زمین‌شناسی برای مدیریت آب‌های سطحی استفاده کرد.

منابع

- احمدی، حسن (۱۳۹۴). ژئومورفولوژی کاربردی، جلد اول: فرسایش آبی. چاپ هشتم، انتشارات دانشگاه تهران، ۶۸۸ صفحه.
- آوند، محمدتقی، مرادی، حمیدرضا، و رمضان‌زاده لسبویی، مهدی (۱۳۹۹). تهیه نقشه حساسیت سیل با استفاده از دو مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی و مدل خطی تعمیم یافته بیزین. محیط زیست و مهندسی آب، ۱۶(۱)، ۸۳-۹۵. doi: 10.22034/jewe.2020.220593.1351
- بختیاری یگانه، عباس، و حمزه ضیابری، سید محمود (۱۳۹۶). پیش‌بینی حرکات سواش امواج فراقلی بر روی سواحل طبیعی با استفاده از مدل‌های درختی M5 و MARS. مهندسی/میرکبیر، ۵۰(۳)، ۴۴۵-۴۵۲. doi: 10.22060/ceej.2017.8712.4640
- حسنوند، شکوفه، سپهوند، علیرضا، ترینان، فرج الله و پروین، سپه‌هاک (۱۴۰۰). ارزیابی مدل‌های نفوذ در خاک سطحی سازندهای زمین‌شناسی حوضه الشتر، استان لرستان. پژوهش‌های آب‌خیزداری، ۱۵۰-(۴)، ۱۵۰-۱۶۴. doi: 10.22092/wmrj.2021.354035.1398
- رفاهی، حسینقلی (۱۳۹۴). فرسایش آبی و کنترل آن. انتشارات دانشگاه تهران، چاپ هفتم، ۶۸۱ صفحه.
- سپهوند، علیرضا، طایبی سمیرمی، مجید، میرنیا، خلاق و مرادی، حمیدرضا (۱۳۹۰). ارزیابی حساسیت مدل‌های نفوذ به تغییرپذیری رطوبت خاک. آب و خاک، ۲۵(۲)، ۱۱-۱۱. doi: 10.22067/jsw.v0i0.9387
- ستاری، محمدتقی و نهرین، فرزاد (۱۳۹۲). پیش‌بینی مقادیر حداکثر بارش روزانه با استفاده از سیستم‌های هوشمند و مقایسه آن با مدل درختی M5؛ مطالعه موردی ایستگاه‌های اهر و جلفا. مهندسی آبیاری و آب/ایران، ۴(۲)، ۸۳-۹۸.
- سعیدیان، حمزه، و مرادی، حمیدرضا (۱۳۹۹). تعیین مهم‌ترین عامل‌های مؤثر بر نفوذپذیری خاک تشکیل شده از سازندهای گچساران و آغاچاری در کاربری‌های مختلف. پژوهش‌های آب‌خیزداری، ۲۳(۲)، ۹۷-۱۰۹. doi: 10.22092/wmej.2019.126695.1231
- سلیمانی، لیلی، میردربکوند، بهرام، و سپه‌وند، علیرضا (۱۴۰۱). مدل‌سازی نفوذپذیری در رده‌های گوناگون بافت خاک با الگوریتم‌های یادگیری در آبخیز کشکان، استان لرستان. پژوهش‌های آب‌خیزداری، ۳۵(۴)، ۱۰۴-۱۱۶. doi: 10.22092/wmrj.2022.358213.1461
- صادقی، حمیدرضا (۱۳۸۹). مطالعه و اندازه‌گیری فرسایش خاک. انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، چاپ اول، ۱۷۱ صفحه.
- طالبی، علی، و اکبری، زینب (۱۳۹۲). بررسی کارایی مدل درختان تصمیم در برآورد رسوبات معلق رودخانه‌ای. علوم آب و خاک، ۱۷(۶۳)، ۱۰۹-۱۲۱. doi: 20.1001.1.24763594.1392.17.63.10.8
- ظهیری، جواد، و کاشفی پور، سیدمحمود (۱۳۹۷). بررسی کارایی الگوریتم M5 در محاسبه حداکثر عمق چاله آبشستگی اطراف تکیه گاه پل. علوم مهندسی و آبیاری، ۴۱(۱)، ۱-۱۶. doi: 10.22055/JISE.2018.13543
- علیزاده، امین (۱۳۹۷). هیدرولوژی کاربردی. دانشگاه بین‌المللی امام رضا، چاپ چهل و سوم، ۹۴۱ صفحه.
- قربانی دشتکی، شجاع، همایی، مهدی و مهدیان، محمدحسین (۱۳۸۹). تأثیر تغییر کاربری اراضی بر تغییرات مکانی پارامترهای نفوذ آب به خاک. آبیاری و زهکشی/ایران، ۴(۲)، ۲۰۶-۲۲۱.
- قیومی محمدی، امیرمسعود، قربانی دشتکی، شجاع، رئیس، فایز، و طهماسبی، پژمان (۱۳۹۲). اثر رهاسازی اراضی بر تغییرات نفوذ آب به خاک. حفاظت منابع آب و خاک، ۲(۴)، ۴۱-۵۱. doi: 20.1001.1.22517480.1392.2.4.4.9.
- کاوایان، عطا اله، احمدی، رضا، حبیب نژاد، محمود و جعفریان، زینب (۱۳۹۶). بررسی تغییرات مکانی نفوذپذیری خاک با استفاده از روش‌های تجربی و زمین‌آماری در دشت ساحلی بهشهر- گلوگاه. پژوهش‌های آب و خاک/ایران، ۴۸(۱)، ۱۷۷-۱۸۶. doi: 10.22059/ijswr.2017.61351
- کرزنزادی، آیدینگ، و پورقاسمی، حمیدرضا (۱۳۹۸). ارزیابی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل‌های داده کاوی، مطالعه موردی: حوزه آبخیز چهل چای. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۱(۱)، ۲۸-۴۲. doi: 10.22092/ijwmse.2019.118436
- مظفری، غلامعلی، شفیعی، شهاب و تقی زاده، زهرا (۱۳۹۴). ارزیابی کارایی مدل درخت تصمیم رگرسیون در پیش‌بینی خشکسالی نمونه موردی: ایستگاه سینوپتیک سنندج. مخاطرات محیط طبیعی، ۴(۶)، ۱۹-۱۰۱. doi: 10.22111/jneh.2016.2520
- میرهاشمی، سیدحسن، حقیقت جو، پرویز، میرزایی، فرهاد، و پناهی، مهدی (۱۳۹۶). استفاده از الگوریتم CART در پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی در داخل و خارج از شبکه آبیاری. پژوهش‌های آب و خاک/ایران، ۴۹(۲)، ۳۹۵-۳۸۵. doi: 10.22059/ijswr.2017.232795.667677
- نوروزی قوشبلاغ، حسین، و ندیری، عطاالله (۱۳۹۷). پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی دشت بوکان با استفاده از مدل‌های منطق فازی، جنگل تصادفی و شبکه عصبی. مرتع و آب‌خیزداری، ۷۱(۳)، ۸۴۵-۸۴۹. doi: 10.22059/jrwm.2018.68924

پژوهش‌های آب و خاک ایران، ۵۱(۵)، ۱۲۸۱-۱۲۹۱. doi: 10.22059/ijswr.2020.293712.668424

واعظی، علی رضا، و صالحی، یاسین (۱۳۹۹). کارایی مدل‌های نفوذ آب به خاک در کاربری‌های مختلف زمین در حوزه آبخیز تهمچای.

References

- Ahmadi, H. (2015). Applied geomorphology. The first volume: Water erosion. 8th Edition, Tehran University Press, 688 pages. [In Persian].
- Alizadeh, A. (2019). Applied hydrology. Imam Reza International University, 43rd, 941 pages. [In Persian].
- Avand, M., Moradi, H., & Ramzanzadeh Labsoi, M. (2019). Preparation of flood sensitivity map using Bayesian random forest and generalized linear machine learning models. *Environment and Water Engineering*, 6(1), 85-73. <https://sid.ir/paper/362700/fa> [In Persian].
- Bahreman, A., De Smedt, F., Corluy, J., Liu, Y.B., Poorova, J., Velcicka, L., & Kunikova, E. (2007). WetSpa model application for assessing reforestation impacts on floods in Margecany-Hornad Watershed, Slovakia. *Journal of Water Resources Management*, 21(8):1373-1391. doi:10.1007/s11269-006-9089-0
- Bakhtiari Yeganeh, A., & Ziabari, S.M.H. (2017). Forecasting the swash movements of hypergravity waves on natural beaches using M5 and MARS tree models. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(3), 445-452. doi:10.22060/ceej.2017.8712.4640 [In Persian].
- Berry, M.J.A., & Linoff, G.S. (2004). Data mining techniques: for marketing, sales, and customer relationship management. 2nd Edition: Wiley. 672 pages.
- Chattamvelli, R. (2011). Data Mining Algorithms. 1st Edhition. Oxford: *Alpha Science*, 274-290.
- Fischer, C., Tischer, J., Roscher, C., Eisenhauer, N., Ravenek, J., Gleiner, G., Attinger, S., Jensen, B., Kroon, H., Momer, L., Scheu, S., & Hildebrandt, A. (2015). Plant species diversity affects infiltration capacity in an experimental grassland through changes in soil properties. *Plant and Soil*, 397(1), 1-16. doi:10.1007/s11104-014-2373-5
- Fox, D.M., Bryan, R.B., & Price, A.G. (1997). The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions. *Geoderma*, 80(1-2), 181-194. doi:10.1016/S00167061(97)0007-X
- Ghaiumi Mohammadi, A., Ghorbani Dashtaki, S., Raisi, F. & Tahmasabi, P. (2013). Effect of land abandonment on variation of soil water infiltration parameters. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 2(4), 41-51. doi: 20.1001.1.22517480.1392.2.4.4.9 [In Persian].
- Ghorbani Dashtaki, Sh., Homai, M. & Mahdian, M. (2009). Effect of land abandonment on variation of soil water infiltration parameters. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 4(2), 206-221. [In Persian].
- Hasanvand, SH., Spahvand, A., Tarnian, F., & Sihag, P. (2021). An assessment of infiltration models in the surface soil of geological formations in Alshtar Watershed, the Province of Lorestan. *Watershed Management Research*, 34(4), 150-164. doi:10.22092/wmrj.2021.354035.1398 [In Persian].
- Horton Robert, E. (1993). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions American Geophysical Union (AGU), Advancing earth and space sciences*, 14(1), 446-460. doi:10.1029/TR014i001p00446
- Kavian, A., Ahmadi, R., Habibnejad, M., & Jafarian, Z. (2017). Evaluation of spatial changes in soil infiltration using experimental and geostatistical methods in coastal plain of Behshahr-Galugah. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(1), 177-186. doi:10.22059/ijswr.2017.61351 [In Persian].
- Kocev, D., Saso, D., White, M.D., Newell, G.R., & Griffioen, P. (2009). Using single-and multitarget regression trees and ensembles to model a compound index of vegetation condition. *Ecological Modeling*, 220(8), 1159 -1168. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2009.01.037
- Kornejady, A., & Pourghasemi, H.R. (2019). Landslide susceptibility assessment using data mining models, A case study: Chehel-Chai basin. *Watershed Engineering and Management*, 11(1), 28-42. doi: 10.22092/ijwmse.2019.118436 [In Persian].
- Lee, S., Hwang, J., & Park, I. (2013). Application of data-driven evidential belief functions to landslide susceptibility mapping in Jinbu, Korea. *Catena*, 100(3), 15-30. doi:10.1016/j.catena.2012.07.014
- Machiwal, D., Jha, M.K., & Mal, B.C. (2006). Modelling Infiltration and quantifying Spatial Soil Variability in a Wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering*, 95(4), 569-582. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2006.08.007
- Mahesh, P., & Mather, P. M. (2003). An assessment of the effectiveness of decision tree methods for land cover classification. *Remote Sensing of Environment*, 86(4), 554-565. doi:10.1016/S0034-4257(03)00132-9
- Maria, A. (1997). Introduction to modeling and simulation. Proceedings of the 29th Conference on Winter simulation, December 07 - 10, Atlanta, GA, USA, 7-13.
- Mehta, V., Hasanvand, Sh., Sepahvand, A., Sihag, P., Beiranvand, N., & Singh, B., (2024). A benchmark comparison of AI-based modeling of soil infiltration rates. *Journal of Hydroinformatics*, 26(12): 3060-3079. doi: 10.2166/hydro.2024.086
- Mirhashemi, S.H., Haghighat jou, P., Mirzaei, F., & Panahi, M. (2018). Using CART algorithm in predicting groundwater table fluctuations inside

- and outside of an irrigation system (case study: irrigating area of Qazvin). *Water and Soil Research*, 49(2), 395-385. doi:10.22059/ijswr.2017.232795.667677 [In Persian].
- Mozaffari, G., Shafie, S., & Tagizadeh, Z. (2015). Evaluate the performance regression decision tree model in predicting drought (case study: synoptic station in Sanandaj). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 4(6(Serial Number 6)), 1-19. doi:10.22111/jneh.2016.2520 [In Persian].
- Mukheibir, P. (2008). Water resources management strategies for adaptation to climate-induced impacts in South Africa. *Water Resource Management*, 22(9), 1259-1276. doi:10.1007/s11269-007-9224-6
- Norouzi, H., & Nadiri, A. (2018). Groundwater level prediction of Boukan Plain using fuzzy logic, random forest and neural network models. *Journal of Range and Watershed Managment*, 71(3), 829-845. doi: 10.22059/jrwm.2018.68924 [In Persian].
- Osuji, G.E., Okon, M.A., Chukwuma, M.C., & Nwarie, I.I. (2010). Infiltration characteristics of soils under selected land use practices in Owerri, Southeastern Nigeria. *World Journal of Agricultural Sciences*, 6(3), 322-326.
- Pal, M., & Deswal, S. (2010). Modelling plie capacity using Gaussian process regression. *Computers and Geotechnics*, 37(7-8), 942-947. doi:10.1016/j.compgeo.2010.07.012
- Refahi, H. (2015). Water erosion and control. 7th Edition, Tehran University Press. 681 pages. [In Persian].
- Ribolzi, O., Patin, J., Bresson, L.M., Latsachack, K.O., Mouche, E., Sengtaheuanghoung, O., Silvera, N., Thiebaut, J.P., & Valentin, C. (2011). Impact of slope gradient on soil surface features and infiltration on steep slopes in northern Laos. *Geomorphology*, 127(1-2), 53-63. doi:10.1016/j.geomorph.2010.12.004
- Rusjan, S., & Micos, M. (2008). Assessment of hydrological and seasonal controls over thenitrate flushing from a forested watershed using a data mining technique. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(2), 645-656. doi: 10.5194/hessd-4-4211-2007
- Sadeghi, H.R. (2010). Study and measurement of soil erosion. Tarbiat Modares University Publication. 1st Edition. 171 pages. [In Persian].
- Saeediyani, H., & Moradi, H. R. (2020). Determining of the most important factors in infiltration rates of the soils formed on Gachsaran and Aghajari formations in various land uses. *Watershed Management Research*, 33(2(Serial Number 127)), 97-109. doi: 10.22092/wmej.2019.126695.1231 [In Persian].
- Sattari, M.T., & Nahrin, F. (2012). Monthly rainfall prediction using Artificial Neural Networks and M5 model tree (Case study: Stations of Ahar and Jolfa). *Irrigation and Water Engineering*, 4(2(Serial Number 14)), 83-98. [In Persian].
- Sepahvand, A., Sihag, B., Ghobadi, M., & Sihag, P. (2021). Estimation of infiltration rate using datadriven models. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(1), 1-11. doi: 10.1007/s12517-020-06245-2
- Sepahvand, A., Sihag, P., Singh, B., & Zand, M. (2018). Comparative evaluation of infiltration Models. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(10), 4173-4184. doi:10.1007/s12205-018-1347-1
- Sepavand, A., Taie Semiromi, M., Mirnia, S.K., & Moradi, H.R. (2011). Assessing the Sensitivity of Infiltration Models to Variability of Soil Moisture. *Journal of Water and Soil*, 25(2), 1-11. doi: 10.22067/jsw.v0i0.9387 [In Persian].
- Sihag, P., Singh, B., Sepahvand, A., & Mehdipour, V. (2020). Modeling the infiltration process with soft computing techniques. Indian Society for Hydraulics (ISH) *Journal of Hydraulic Engineering*, 26(2), 138-152. doi:10.1080/09715010.2018.1464408
- Sihag, P., Singh, V.P., Angelaki, A., Kumar, V., Sepahvand, A., & Golia, E. (2019). Modelling of infiltration using artificial intelligence techniques in semi-arid Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 64(13):1647-1658. doi:10.1080/02626667.2019.1659965
- Soleimani, L., Mir Derikvand, B., & Sepahvand, A. (2022). Modelling of infiltration rate in different soil textures using soft computing techniques in Kashkan Watershed, Lorestan Province. *Watershed Management Research*, 35(4), 104-116. doi: 10.22092/wmrj.2022.358213.1461 [In Persian].
- Talebi, A., & Akbari, Z. (2013). Investigation of ability of decision trees model to estimate river suspended sediment (case study: Ilam Dam Basin). *Journal of Water and Soil Science*, 17(63), 109-121. doi: 20.1001.1.24763594.1392.17.63.10.8 [In Persian].
- Trigila, A., Frattini, P., Casagli, N., Catani, F., Crosta, G., Esposito, C., & Spizzichino, D. (2013). Landslide susceptibility mapping at national scale: the Italian case study. *Landslide Science and Practice*, Springer Berlin Heidelberg, 12, 287-295. doi:10.1007/978-3-642-31325-7_38
- Vaezi, A., & Salehi, Y. (2020). The efficiency of water infiltration models in different land uses of the Tahamchai Catchment. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(5), 1281-1291. doi: 10.22059/ijswr.2020.293712.668424 [In Persian].
- Ward, A.D., & Trimble, S.W. (2004). *Environmental Hydrology*. 2nd Edition, CRC Press LLC, 475 pages.
- Witten, I.H., Frank, E., & Hall, M. (2005). *Data Mining: Practical machine learning tools and*

- techniques. 2nd Edition, The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems, 664 pages.
- Yang, D., Zhang, X., Pan, R., Wang, Y., & Chen, Z. (2018). A novel Gaussian process regression model for state-of-health estimation of lithium-ion battery using charging curve. *Journal of Power Sources*, 384, 387-395. doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.03.015
- Yimer, F., Messing, I., Ledin, S., & Abdelkadir, A. (2008). Effects of different land use types on infiltration capacity in a catchment in highlands of Ethiopia. *Soil Use and Management*, 24(4), 344-349. doi:10.1111/j.1475-2743.2008.00182.x
- Zahiri, J., & Kashefipour, S.M. (2018). Predicting maximum scour depth around bridge abutment using M5 model. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*. 41 (1), 1-16. doi: 10.22055/JISE.2018.13543 [In Persian].