Journal of Rangeland

Print ISSN: 2008-0891
Online ISSN: 2676-5039

Modeling of Infiltration Rate in Different Vegetation Types by Various Soft Computing Techniques (Case Study: Alashtar Watershed, Lorestan Province)

Nasrin Beiranvand[1], Shokofeh Hasanvand[1], Alireza Sepahvand*[2], Farajolah Tarnian[3], Negar Arjmand[4]

1. PhD. Student of Watershed Management, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran.
2. Corresponding author; Associate Prof., Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: Sepahvand.a@lu.ac.ir
3. Assistant Prof., Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran.
4. MSc. Student of Watershed Management, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

Article Info

Article type:
Research Full Paper

2025; Vol 18, Issue 4

Article history:
Received: 11.07.2024
Revised: 14.02.2025
Accepted: 16.02.2025

Keywords:
Lorestan Province, Alashtar Watershed, Infiltration, Vegetation Types, Learning Algorithms.

Abstract

Background and objectives: During the rainy season, soil infiltration replenishes soil moisture in semiarid regions, influencing vegetation regeneration, erosion potential, and groundwater recharge. Infiltration of water into soil is a key process for providing water supply to plants and plays an essential role in controlling surface runoff and groundwater. This study investigated infiltration modeling in different vegetation types (Quercus brantii, Astragalus ecbatanus-Euphorbia denticulate, Grass, and Grass-Astragalus rhodoseminus) in the Alashtar watershed, Lorestan Province, Iran.

Materials and Methods: The study area, part of the Kashkan watershed in Lorestan Province, was selected for modeling infiltration rates using various soft computing techniques. The study area is located between 48°10′28″ - 48°23′29″ N latitudes and 33°45′17″ - 33°51′23″ E longitudes, covering approximately 112.54 km². Elevation varies from 1481 to 3613 meters above sea level. The area has a cold and semiarid climate with a mean annual rainfall of less than 570 mm. Five soft computing techniques—Support Vector Machine (SVM), Gaussian Process (GP), Multi-Layer Perceptron (MLP), and Random Forest (RF)—were used to model infiltration rates. The total dataset comprised physical soil characteristics, with 70% used for training and 30% for testing the models. The input data included time, sand, clay, silt, soil density, and soil moisture, while the output data were infiltration rates measured using a double-ring infiltrometer at 23 locations. Three statistical parameters—coefficient of correlation (C.C), Root Mean Square Error (RMSE), and Mean Absolute Error (MAE)—were used to compare the efficiency of all models.

Results: The results indicated that the Astragalus ecbatanus-Euphorbia denticulate vegetation type had higher cumulative infiltration and average infiltration rates. Among the models, Random Forest (RF) and Gaussian Process with PUK kernel (GP-PUK) showed the least error in estimating infiltration rates with the input combination of time, sand, clay, silt, soil density, and soil moisture. The GP-PUK

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-06-07]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8]

model demonstrated acceptable accuracy in Quercus brantii and Astragalus ecbatanus-Euphorbia denticulate vegetation types with correlation coefficients of 97.2% and 98.4%, respectively. The RF models performed better than other models in estimating infiltration rates for Grass and Grass-Astragalus rhodoseminus vegetation types, with correlation coefficients of 83.9% and 99.9%, respectively.

Conclusion: Predicting infiltration rates is crucial for hydrologic design, watershed management, irrigation, and agricultural studies. The results show that soft computing techniques have suitable capabilities to predict soil infiltration rates. These models can quantify infiltration amounts and estimate runoff in different vegetation types. The research findings can help local authorities manage and develop their areas systematically and effectively.

Cite this article: Beiranvand, N., Sh. Hasanvand, A. Sepahvand, F. Tarnian, N. Arjmand, 2025. Modeling of Infiltration Rate in Different Vegetation Types by Various Soft Computing Techniques (Case Study: Alashtar Watershed, Lorestan Province). Journal of Rangeland, 18(4): 565-581.

© The Author(s).
DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8
Publisher: Iranian Society for Range Management

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-06-07]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8]

شاپا چاپی: ۰۸۹۱-۲۰۰۸
شاپا الکترونیکی: ۵۰۳۹-۲۶۷۶

مـــرتـــع

مدل‌سازی نفوذپذیری در تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری مختلف (منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز الشتر)

نسرین بیرانوند[۱]، شکوفه حسنوند[۱]، علیرضا سپه‌وند[۲*]، فرج اله ترنیان[۳]، نگار ارجمند[۴]

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. رایانامه: sepahvand.a@lu.ac.ir
۳. استادیار گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.
۴. دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل – پژوهشی

۱۴۰۳؛ جلد ۱۸، شماره ۴

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۰۴/۲۱
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۸

واژه‌های کلیدی:
استان لرستان،
حوضه الشتر،
نفوذپذیری،
پوشش‌گیاهی،
الگوریتم‌های یادگیری.

چکیده

سابقه و هدف: در طول فصل بارندگی، نفوذ آب در خاک، رطوبت خاک را در مناطق نیمه‌خشک جبران می‌کند در بهبود پوشش گیاهی، پتانسیل فرسایش و تغذیه آب‌های زیرزمینی تأثیر می‌گذارد. نفوذ آب به خاک مهم‌ترین منبع تامین‌کننده آب برای حیات گیاهان است و نقش اساسی در کنترل آب‌های سطحی و زیرزمینی دارد. به‌دلیل اهمّیت موضوع، در این تحقیق به مدل‌سازی نرخ نفوذپذیری در تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی (تیپ‌های بلوط، گون-فرفیون، گراس و گراس-گون) با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری در حوضه الشتر استان لرستان پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها: منطقه مورد مطالعه از نظر ژئومورفولوژیکی در بخش مرکزی زاگرس در استان لرستان قرار دارد که خود بخشی از زیر حوزه کرخه می‌باشد. زیر حوزه الشتر مطابق شکل (۱) بین طول‌های جغرافیایی "۲۸ ´۱۰ ˚۴۸ تا "۲۹ ´۲۳ ˚۴۸ شرقی و عرض‌های "۱۷ ´۴۵ ˚۳۳ تا "۲۳ ´۵۱ ˚۳۳ شمالی با مساحت ۷۹۷/۶۴ کیلومتر مربع قرار گرفته است. بلندترین نقطه حوضه در بخش شمال شرقی با ارتفاع ۳۶۱۳ متر و پست‌ترین نقطه حوضه در بخش جنوبی با ارتفاع ۱۴۸۱ متر از سطح دریا قرار دارد. میانگین بارندگی سالانهٔ منطقه ۵۷۰ میلی‌متر بوده و بر اساس روش دومارتن، اقلیم منطقه نیمه‌خشک و سرد است. در این تحقیق برای مدل‌سازی نفوذپذیری در تیپ‌های مختلف گیاهی از الگوریتم‌های یادگیری RF، MLP، GP-PUK، GP-RBF، SVM-PUK و SVM-RBF استفاده شد که ۷۰ درصد داده‌های آموزش و ۳۰ درصد داده‌های آزمایش در نظر گرفته شد. داده‌های ورودی برای مرحله‌ی آموزش و آزمایش مدل داده‌های زمان، درصد رطوبت وزنی، درصد رس، درصد لای، درصد شن، و جرم مخصوص ظاهری به کار برده شد و اندازه‌ی سرعت نفوذپذیری به‌عنوان داده‌ی خروجی در نظر گرفته شد. در نهایت مدلی که با توجه به معیارهای ارزیابی، بهترین جواب را ارائه داد به‌عنوان مدل برتر انتخاب شد. سپس برای ارزیابی دقت مدل‌های نفوذ از پارامترهای آماری ضریب همبستگی (CC)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد.

نتایج: مطابق نتایج به‌دست آمده بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار نفوذ متوسط به‌ترتیب متعلق به تیپ گون-فرفیون و تیپ گراس-گون با میزان ۱۴/۴ و ۶/۲۵ سانتی‌متر در ساعت می‌باشد که این تفاوت می‌تواند حجم وسیعی از آب را به داخل خاک نفوذ دهد یا بر روی سطح خاک به شکل رواناب جریان یابد. تیپ گیاهی گراس با

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-06-07]
[DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8]

میزان ۱۴/۳ سانتی‌متر در ساعت در رتبه دوم بیش‌ترین مقدار نفوذ متوسط قرار گرفت. همچنین حداکثر سرعت نفوذ با مقدار ۳۷/۲ سانتی‌متر در ساعت متعلق به تیپ گیاهی گون-فرفیون و حداقل سرعت نفوذ با مقدار ۲۲/۸ سانتی‌متر در ساعت متعلق به تیپ گیاهی گراس-گون می‌باشد. مطابق نتایج تحقیق مقدار متوسط و تجمعی نفوذپذیری در تیپ گون-فرفیون بیش‌تر از دیگر تیپ‌های پوشش گیاهی است. در ادامه نتایج حاصل از مدل‌سازی با استفاده از مدل‌های ذکرار شده نشان داد در تیپ‌های بلوط و گون- فرفیون مدل GP با کرنل PUK با ضریب تبین ۹۷/۲ و ۴۹۸ درصد نسبت به سایر مدل‌ها با توجه به معیارهای ارزیابی از عملکرد بهتری برخوردار بوده است. در تیپ‌های گراس و گراس-گون بین مدل‌ها RF به‌عنوان مدل برتر انتخاب شد. در بخش آزمایش تیپ گراس به‌ترتیب برابر ۰/۸۲، ۰/۱۰۲ و ۰/۰۶۴ بوده و در تیپ گراس-گون در بخش آزمایش نتایج به‌همین ترتیب برابر ۰/۹۹، ۰/۰۰۵۲ و ۰/۰۰۴۴ به‌دست آمده است.

نتیجه‌گیری: پیش‌بینی میزان نفوذپذیری یکی از پارامترهای اساسی در رابطه با هیدرولوژی، مدیریت حوزه‌های آبخیز، آبیاری و مطالعات مرتبط با کشاورزی است. لذا بر اساس نتایج به‌دست آمده از این تحقیق، الگوریتم‌های یادگیری یکی از روش‌های مناسب برای تخمین میزان نفوذپذیری آب در خاک‌های با پوشش و تیپ‌های مختلف گیاهی هستند. در مجموع با توجه به نتایج این تحقیق و با بررسی نتایج به‌دست آمده از تحقیقات پیشین می‌توان به این نتیجه رسید که در رابطه با موضوع مدل‌سازی نفوذپذیری خاک در تیپ‌های پوشش گیاهی مختلف، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین به‌ویژه فرآیند گوسی (GP) و مدل جنگل تصادفی (RF) کاربرد داشته و می‌توان در بازه‌های زمانی متفاوت و حوضه‌های مطالعاتی مختلف، از این مدل‌ها به‌منظور برآورد میزان نفوذپذیری و همچنین تخمین رواناب منطقه استفاده کرد.

استناد: بیرانوند، ن.، ش. حسنوند، ع. سپه‌وند، ف. ترنیان، ن. ارجمند، ۱۴۰۳. مدل‌سازی نفوذپذیری در تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی با استفاده از الگوریتم-های یادگیری مختلف (منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز الشتر). مرتع، ۱۸(۳): ۵۶۵-۵۸۱.

DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8

© نویسندگان

ناشر: انجمن علمی مرتعداری ایران

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-06-07]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8]

مقدمه

نفوذ آب به خاک به عوامل متعددی مانند بافت، کاربری و مدیریت زمین، میزان سنگ‌ریزه، فشردگی و بودن درز و شکاف در خاک، مقدار مواد جامد معلق در آب نظیر رس و لای، ریشه گیاه، مواد آلی، میزان لاشبرگ سطحی، رطوبت اولیه، نسبت جذب سدیم، جرم ویژه ظاهری خاک، شدت بارندگی و دمای آب و خاک، .... بستگی دارد (۸، ۱۸ و ۳۵). نوع کاربری اراضی با تاثیر بر فرآیند نفوذ آب به خاک، نقش مهمی در مدیریت بحران خشکسالی، حفاظت خاک و کنترل رواناب و سیل دارد. کاربری اراضی از طرق گوناگون از جمله تغییر ویژگی‌های سطح خاک و هندسه منافذ خاک، بر نفوذ آب به خاک تاثیر می‌گذارد. کاربری‌های مختلف از یک طرف خصوصیات فیزیکی و مقدار جریان عبوری در خاک و در نتیجه هدایت هیدرولیکی را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد و از طرف دیگر مقدار رطوبت باقی‌مانده در خاک در مکش‌های مختلف در اراضی با کاربری‌های مختلف را دچار تغییرات می‌نماید. تغییر کاربری‌های مختلف اراضی نیز با ایجاد بهم‌خوردگی سطح خاک و اثر بر میزان پوشش گیاهی، تاثیر زیادی بر میزان نفوذپذیری، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و هیدرولیکی خاک دارد (۱۷ و ۲۸). پوشش گیاهی و بنابراین نحوه استفاده از زمین، در کنترل نفوذ بسیار مؤثرند. گیاهان و لاشبرگ آن‌ها، خاک را در مقابل ضربات باران محافظت می‌کنند و همچنین گیاهان موجب تولید موادآلی برای به هم پیوستن ذرات خاک به صورت خاک‌دانه می‌شوند. جانوران خاکزی به این فرآیند از طریق به هم زدن ذرات معدنی و موادآلی خاک کمک می‌کنند. دست‌کاری گیاهان در هنگام استفاده از زمین، سبب تغییرات زیاد در ظرفیت نفوذ تحت رژیم بارندگی و نوع خاک یکسان می‌شوند (۳۱). پوشش گیاهی با تغییر در تاج پوشش و سطح برگ، ظرفیت فیزیولوژیکی و عمق ریشه، ذخیره رطوبتی و همچنین فرسایش خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۶ و ۳۴). از جنبه هیدرولوژیکی، تاج پوشش گیاهی فرسایش خاک را با گیرش بارندگی و هدایت امن آب به خاک و کاهش انرژی قطرات باران و تاثیرات فرسایش بارانی و افزایش نفوذپذیری کنترل می‌کند (۲ و ۷). اگر تغییر در پوشش گیاهی تا حد تخریب خاک پیش رود ممکن است هیچ‌گاه پوشش گیاهی اولیه به منطقه باز نگردد و موجب شود که خاک به‌عنوان مخزن رطوبت عمل نکند. هر عاملی که رطوبت را در خاک کاهش دهد سبب محدود شدن کل فعالیت‌های بیولوژیکی نیز خواهد شد. خاک‌های ضعیف در مناطق خشک و نیمه‌خشک دائماً به‌وسیله فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه از طریق برداشت پوشش گیاهی تهدید می‌شوند. برداشت و بهره‌برداری‌های بی‌رویه گیاهان می‌تواند جریان آب را در سطح مرتع تسریع کند و مقدار آبی را که به خاک فرو می‌رود کاهش دهد. تغییرات نفوذپذیری به عوامل متعدد مرتبط با گیاه ازجمله پوشش تاجی، سن گیاه، مواد آلی و مراحل توالی گیاهان موجود در خاک بستگی دارد (۱ و ۱۱). در ارتباط با مدل‌سازی نفوذپذیری در تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی تحقیقات خیلی کمی انجام شده است که از جمله می‌توان به پژوهش زیر اشاره کرد. حسنوند و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی تغییرات نفوذپذیری و ارزیابی مدل‌های آن در تیپ‌های گیاهی مختلف حوزه آبخیز الشتر در استان لرستان پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود از استوانه‌های مضاعف برای اندازه‌گیری نفوذ و مدل‌های تجربی و سنتی برای مدل‌سازی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل گرین-آمپت اصلاح شده برای اکثر تیپ‌ها دارای دقت بالاتری برای اندازه‌گیری نفوذپذیری آب در خاک نسبت به دیگر مدل‌های استفاده شده بود (۱۰). ژو و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی تغییرات خصوصیات نفوذپذیری تحت تأثیر پوشش سطح زمین در منطقه خاک سیاه شمال شرقی چین پرداختند. در این تحقیق هشت کاربری و پوشش مختلف زمین برای بررسی تغییرات در خصوصیات نفوذپذیری خاک بین کاربری‌های اراضی و پوشش مختلف برای شناسایی عوامل تأثیرگذار غالب آن‌ها انتخاب شدند. نتایج تحقیق نشان داد که تفاوت در میزان نفوذپذیری خاک به خصوصیات بافت خاک و همچنین تغییرات پوشش گیاهی بستگی دارد (۳۶). به‌طور کلی شرایط هیدرولوژیکی خاک تحت تاثیر روابط متقابل پیچیده‌ای از فاکتورهای توپوگرافی، خاکی، پوشش گیاهی و مدیریتی است (۱۵) و نفوذپذیری شاخص مناسبی برای نشان دادن آن است (۲۹). از این‌رو اندازه‌گیری و کمی‌کردن پدیده نفوذ آب به خاک در مدیریت منابع آب و حوزه‌های آبخیز، از اهمیّت زیادی برخوردار است. بنابراین انواع مختلفی از مدل‌ها، با درجات مختلفی از پیچیدگی، برای

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-06-07]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8]

رسیدن به این اهداف توسعه یافته‌اند. این مدل‌ها برای درک بهتری از فرآیندهای نفوذ طراحی شده‌اند و ابزاری برای ارزیابی و بررسی مشکلات محیطی در کاربری‌های مختلف هستند که امروزه استفاده از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در مسائل مرتبط با منابع طبیعی گسترش زیادی یافته‌اند و در بیشتر موارد دقت بالای در رابطه با اندازه‌گیری نفوذ نسبت به مدل‌های تجربی و سنتی از خود نشان داده‌اند. لذا بر اساس ضرورت اندازه‌گیری و تخمین نفوذپذیری آب در خاک و همچنین پوشش مختلف سطح زمین، هدف این تحقیق تعیین میزان نفوذپذیری آب در خاک با استفاده از استوانه‌های مضاعف و مدل‌سازی نفوذپذیری در تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری RF، GP-PUK، GP-RBF، MLP، SVM-PUK و SVM-RBF است. در واقع در این تحقیق سعی شده است که تأثیر نوع پوشش گیاهی مختلف سطح زمین بر میزان نفوذپذیری و همچنین کاهش روآناب سطحی تعیین شود.

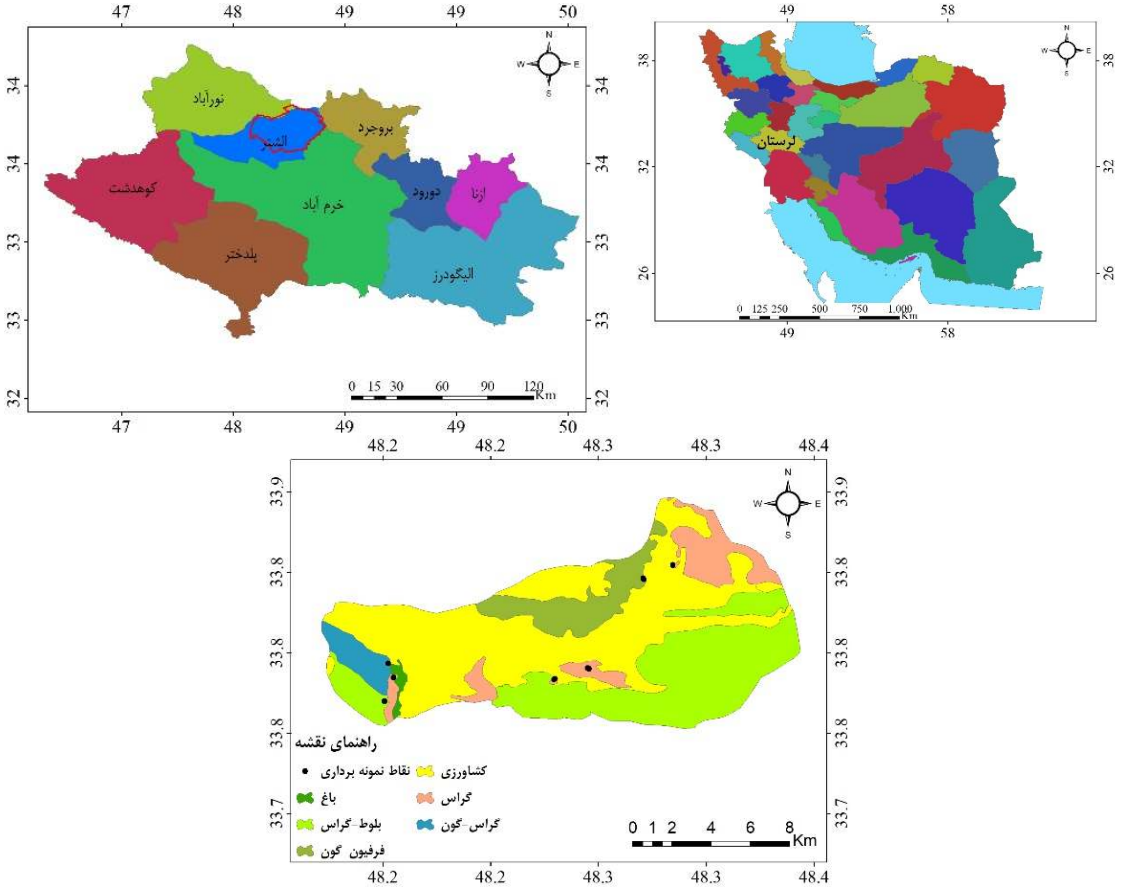
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه از نظر ژئومورفولوژیکی در بخش مرکزی زاگرس در استان لرستان قرار دارد که خود بخشی از زیر حوضه کرخه است. زیر حوزه الشتر مطابق شکل (۱) بین طول‌های جغرافیایی "۲۸ ´۱۰ ˚۴۸ تا "۲۹ ´۲۳ ˚۴۸ شرقی و عرض‌های "۱۷ ´۴۵ ˚۳۳ تا "۲۳ ´۵۱ ˚۳۳ شمالی با مساحت ۷۹۷/۶۴ کیلومتر مربع قرارگرفته است. بلندترین نقطه حوضه در بخش شمال شرقی با ارتفاع ۳۶۱۳ متر و پست‌ترین نقطه حوضه در بخش جنوبی با ارتفاع ۱۴۸۱ متر از سطح دریا قرار دارد. میانگین بارندگی سالانهٔ منطقه ۵۷۰ میلی‌متر بوده و بر اساس روش دومارتن، اقلیم منطقه نیمه‌خشک و سرد است. تیپ‌بندی پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث انجام گردید. سپس مرزها در منطقه کنترل و اصلاح گردیدند. به‌طور کلی چهار تیپ گیاهی *Annual Grass- Astragalus rhodoseminus* (گراس-گون)، *Astragalus ecbatanus- Euphorbia denticulata* (گون-فرفیون)، *Quercus brantii* (بلوط ایرانی) و *Annual Grass* (گراس) در منطقه مطالعاتی تشخیص داده شد (شکل ۱). جدول (۱) پوشش سطح زمین، وضعیت و گرایش تیپ‌های گیاهی مختلف را نشان می‌دهد. تیپ گندمیان یکساله با ۶۰ درصد، بیشترین درصد پوشش گیاهی و تیپ گراس- گون کمترین درصد پوشش گیاهی را به خود اختصاص داده است. همه تیپ‌های گیاهی دارای وضعیت فقیر و گرایش منفی بودند.

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-06-07]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8]



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه روی نقشه ایران، استان لرستان و نقشه تیپ‌های گیاهی

جدول ۱: برخی از مشخصات رویشگاهی تیپ‌های گیاهی مورد مطالعه

مشخصات تیپ	گراس-گون	گون فرفیون	بلوط	گراس
پوشش گیاهی (٪)	۲۵٪	۴۰	۵۰	۶۰
سنگ و سنگریزه (٪)	۴۰٪	۳۵	۱۵	۱۵
خاک لخت (٪)	۳۰٪	۱۵	۲۰	۱۵
لاشبرگ (٪)	۵٪	۱۰	۱۵	۱۰
وضعیت	فقیر	فقیر	فقیر	فقیر
گرایش تیپ	منفی	منفی	منفی	منفی
جهت کلی	شرقی	جنوبی	شرقی	شرقی

روش تحقیق

در این تحقیق از استوانه مضاعف برای تعیین میزان نفوذ آب و مدل‌سازی نفوذ در تیپ‌های گیاهی مختلف در مراتع شهرستان الشتر استفاده شد. ابتدا با استفاده از نقشه پوشش سطح زمین و همچنین بازدیدهای میدانی نقشه تیپ پوشش گیاهی منطقه تهیه شد و در ادامه با استفاده از همین نقشه در محیط نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نقاط نمونه‌برداری جهت اندازه‌گیری نفوذ در هر تیپ پوشش گیاهی به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. با توجه به اینکه ممکن بود نقاط انتخاب شده دارای شیب بوده که مناسب اندازه‌گیری نفوذ نباشند، لذا با پیمایش صحرایی و دید کارشناسی، نقطه یا نقاط مناسب برای اندازه‌گیری نفوذ انتخاب شدند. بعد از مشخص شدن محل‌های نمونه‌برداری، از استوانه‌های مضاعف به‌دلیل رایج بودن شیوه و همچنین ایجاد اطلاعات مفید در صورت کاربرد صحیح (۲۳، ۲۷ و ۳۲)، جهت اندازه‌گیری نفوذ استفاده شد (شکل ۲). جهت نشان دادن تغییرات بهتر مقدار نفوذ در طول زمان، در زمان‌های ۲/۵، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ دقیقه میزان نفوذ ثبت شد (۲۲، ۲۳ و ۲۶) و در هر یک از تیپ‌های مختلف گیاهی سه تکرار برداشت شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان نفوذ در هر تیپ گیاهی به‌صورت نمودار و مقایسه بین مقادیر واقعی و تخمین حاصل از مدل‌های

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-06-07]
[DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8]

مختلف نفوذ ارائه شده است. به‌منظور بررسی نموداری نتایج، ابتدا با تهیه بانک اطلاعاتی در نرم‌افزار EXCEL 2016 یک پایه زمانی مشترک برای تمامی اندازه‌گیری‌ها لحاظ گردید. بر اساس نتایج به‌دست آمده پایه زمانی ۶۰ دقیقه با توجه به مدت زمان ثابت‌شدن سرعت نفوذ در تیپ‌های مختلف گیاهی انتخاب شد و نمودارهای تغییرات سرعت نفوذ نسبت به زمان در آن‌ها ترسیم شد. در بخش دیگر تحقیق با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری RF، GP-PUK، GP-RBF، MLP، SVM-PUK و SVM-RBF مدل‌سازی نفوذپذیری در تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی انجام گرفت که ۷۰ درصد داده‌های آموزش و ۳۰ درصد داده‌های آزمایش در نظر گرفته شد. داده‌های ورودی برای مرحله‌ی آموزش و آزمایش مدل داده‌های زمان، درصد رطوبت وزنی، درصد رس، درصد لای، درصد شن، و جرم مخصوص ظاهری به کار برده شد و اندازه‌ی سرعت نفوذپذیری به‌عنوان داده‌ی خروجی در نظر گرفته شد. در نهایت مدلی که با توجه به معیارهای ارزیابی، بهترین جواب را ارائه داد به‌عنوان مدل برتر انتخاب شد. سپس برای ارزیابی دقت مدل‌های نفوذ از پارامترهای آماری ضریب همبستگی (CC)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد (جدول ۲). بر این اساس هر چه میزان CC بیش‌تر و میزان RMSE و MAE کم‌تر باشد، مدل از کارایی بیش‌تری برای ارائه بهترین جواب برخوردار است (۲۱ و ۲۵).

شکل ۲: اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری با استفاده از استفوانه‌های مضاعف

جدول ۲: معیارهای سنجش خطا

معیارهای سنجش خطا	رابطه	مقدار بهینه
ضریب همبستگی	$CC = \frac{N\sum HF - (\sum H)(\sum F)}{\sqrt{N(\sum H^2) - (\sum H)^2}\sqrt{N(\sum F^2) - (\sum F)^2}}$	یک
ریشه میانگین مربعات خطا	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i}^{N}(H - F)}$	صفر
میانگین خطای مطلق	$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i}^{N}\lvert H - F\rvert$	صفر

H : داده‌های مشاهده شده، F : داده‌های برآورد شده، N : تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده

الگوریتم تابعی فرآیند گوسی (Gaussian Processes)

فرآیند گوسی مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی است که تعداد محدودی از آن‌ها با توزیع‌های گوسی ادغام شده‌اند. توزیع گوسی در واقع توزیع بین متغیرهای تصادفی بوده، در حالی که فرآیند گوسی بیانگر توزیع بین توابع است که اولویت‌بندی متغیرها را انجام می‌دهد (۱۹ و ۳۳).

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-06-07]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8]

مدل‌های فرآیند گوسی به‌دلیل دانش قبلی درباره وابستگی‌های تابعی و داده‌ها، برای تعمیم به هیچ فرآیند اعتبارسنجی نیاز ندارند و قادر به درک توزیع پیش‌بینی متناظر با ورودی آزمون‌ها هستند (۱۴). تابع فرآیند گوسی $f(x)$ می‌تواند به‌صورت رابطهٔ (۱) بیان شود (۳ و ۱۹).

رابطه (۱):

$$f(x) \sim GP\big(m(x).k(x.x')\big)$$

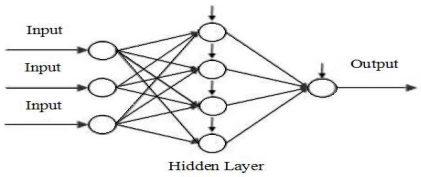
که در آن: GP فرآیند گوسی، $m(x)$ تابع میانگین بوده که معمولاً جهت ساده سازی برابر صفر در نظر گرفته می‌شود، $k(x, x')$ تابع کواریانس در نقاط x و x' و $f(x)$، تابع فرآیند گوسی است.

الگوریتم درخت تصمیم جنگل تصادفی (Random Forest)

الگوریتم RF نخستین بار توسط Breiman ارائه شد و به‌عنوان روشی دقیق در تهیهٔ نقشهٔ کاربری اراضی و طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است (۱۳ و ۱۶). الگوریتم RF شامل ترکیبی از متغیرها در هر گره برای رشد یک درخت یا استفاده از متغیر ورودی تصادفی انتخاب شده است (۴). برای الگوریتم RF دو پارامتر لازم توسط کاربر تعریف شود: تعداد متغیرهای ورودی استفاده شده در هر گره برای تولید یک درخت و تعداد درختان قابل رشد در هر گره، فقط متغیرهای انتخاب شده برای بهترین تقسیم جستجو می‌شوند (۳، ۲۰ و ۲۴).

شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP)

در یک دهه گذشته تمایل به استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در بین هیدرولوژیست‌ها به شدت افزایش یافته است که از آن جمله می‌توان به هسو و همکاران (۱۲)، توکار و مارکوس (۳۰) و بسیاری دیگر اشاره کرد. همهی این محققین به قدرتمند بودن این روش برای مدل‌سازی پدیده‌های مختلف به‌ویژه پدیده‌های غیرخطی اذعان کرده‌اند. از جمله ساختارهای مهم شبکه‌های عصبی، پرسپترون چندلایه (MLP) با الگوریتم پس انتشار خطا است. این الگوریتم به خوبی قادر به‌تقریب توابع دلخواه است (۹). مبانی نظری این الگوریتم همان مبانی نظری روش‌های معمول مبتنی بر مشتقات جزیی گوس-نیوتون و نیتون-رافسون است. در این شبکه از یک لایه ورودی جهت اعمال ورودی‌های مسئله، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی که نهایتاً پاسخ‌های مسئله را ارائه می‌نماید، استفاده می‌شود. برای کار با شبکه عصبی مصنوعی ابتدا باید پارامترهای تاثیرگذار بر خروجی مورد نظر، به‌عنوان لایه‌های ورودی به شبکه داده شوند و سپس تعدادی نقاط تعلیمی در اختیار شبکه قرار بگیرد، تا شبکه با استفاده از این نقاط میزان تاثیر هریک از لایه‌های ورودی را تعیین نماید (۵). در شکل زیر ساختار شبکه عصبی پرسپترون چند لایه نمایش داده شده است.



شکل ۳ شبکه عصبی پرسپترون چند لایه(MLP)

مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM)

روش ماشین بردار پشتیبان یک روش رگرسیون و طبقه‌بندی است که مبتنی بر تئوری آموزش ریاضیاتی است که برای اولین مرتبه ساختار مدل SVM توسط وپنیک (۱۹۹۵) که یک ریاضیدان روسی در دهه ۱۹۶۰ بود، ارائه شد (۲۳). مدل‌های SVM که بر پایه تئوری آموزش احتمال قرار دارند، یک کلاس جدید از مدل‌هایی هستند که به‌منظور طبقه‌بندی و پیش‌بینی در علوم مختلف استفاده می‌شوند. روش‌های طبقه‌بندی SVM بر اساس اصول تفکیک مطلوب طبقات مختلف است که اگر طبقات قابل تفکیک باشند، این روش از میان تعداد نامحدود طبقه‌بندی‌های خطی، آن را انتخاب می‌کند که دارای حداقل باشد.

نتایج

نتایج مربوط به خصوصیات فیزیکی خاک در جدول (۳) نشان می‌دهد که تنها سیلت تفاوت معنی‌دار در تیپ‌های مختلف دارد ($p<0/01$). تفاوت معنی‌دار بین میزان رس، شن، تخلخل، وزن مخصوص و رطوبت در تیپ‌های پوشش گیاهی مورد مطالعه دیده نشد ($p>0/05$). خصوصیات فیزیکی خاک در هر تیپ گیاهی نشان می‌دهد که خاک تیپ گراس-گون دارای بیش‌ترین درصد سیلت

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-06-07]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8]

(۵۴/۳ درصد) و گراس دارای کم‌ترین درصد سیلت (۳۴/۹ درصد) است. اگر چه تفاوت معنی‌داری بین درصد شن و رس در تیپ‌های مختلف دیده نشد ولی درصد شن در تیپ گراس، بیش‌ترین درصد (۴۷/۴ درصد) و در تیپ گون-فرفیون، کم‌ترین درصد (۳۲ درصد)، و درصد رس در تیپ‌های گراس و گون- فرفیون برابر با ۱۷/۷ درصد بیش‌ترین مقدار و در گراس-گون با ۸/۵۵ درصد کم‌ترین بود.

جدول ۳: نتایج برخی خصوصیات خاک در تیپ‌های مختلف گیاهی

تیپ گیاهی	رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	تخلخل (درصد)	آهک (درصد)	وزن مخصوص (gr/cm^3)	درصد رطوبت	ماده آلی (درصد)
گراس-گون	۸/۵۵±۰/۰۰۱ a	۵۴/۳±۰/۰۰۱a	۳۷/۱±/۰۰۱a	۴۸±۰/۰۰۱a	۳۱±۰/۰۰۱a	۱/۸۷±۰/۰۰۱a	۱/۸۶±۰/۰۴a	۱/۴۷±۰/۰۰۱a
گون-فرفیون	۱۷/۷±۲/۸۲ a	۵۰/۳±۱/۴۱ab	۳۲±۴/۲۴a	۵۴±۰/۰۰۱ a	۱۳/۱±۲/۶۵ a	۱/۵۰±۰/۲۵a	۱/۴۲۵±۰/۱۳a	۱/۶۸±۱/۹۹a
بلوط ایرانی	۱۳/۷±۱/۳۰ a	۴۵±۲/۳۳b	۴۱/۳±۲/۳۳b	۵۰±۰/۰۰۱a	۲۴/۶۲±۴/۸a	۱/۴۴۵±۰/۱۷a	۱/۲۸±۰/۰۹a	۱/۸۴±۰/۵۲a
گراس	۱۷/۷±۱۱/۳۴ a	۳۴/۹±۳/۳۵c	۴۷/۴±۱۳/۲۹a	۵۴±۴/۹۸ a	۲۲/۶±۱۱/۷ a	۱/۴۶±۰/۲۰a	۲/۰۳۱±۰/۷۳a	۱/۷۱±۱/۱۲a

اعداد داخل جدول میانگین±انحراف معیار را نشان می‌دهد. حروف مشابه غیر معنی‌داری و حروف نامشابه معنی‌داری در سطح ۵ درصد را نشان می‌دهد.

خصوصیات نفوذ اندازه‌گیری شده در جدول (۴) نشان داده شده‌اند. مطابق نتایج این جدول تفاوت معنی‌داری در خصوصیات نفوذ اندازه‌گیری شده در تیپ‌های گیاهی مختلف مشاهده نشد (p>۰/۰۵). همچنین مطابق نتایج جدول ۵ با اینکه از نظر آماری نفوذ متوسط در تیپ‌های مختلف معنی‌دار نبود، ولی بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار آن به‌ترتیب متعلق به تیپ‌های گون-فرفیون و تیپ گراس-گون با میزان ۱۴/۴ و ۶/۲۵ سانتی‌متر در ساعت می‌باشد که این تفاوت می‌تواند حجم وسیعی از آب را به داخل خاک نفوذ دهد یا بر روی سطح خاک به شکل رواناب جریان یابد. تیپ گیاهی گراس با میزان ۱۴/۳ سانتی‌متر در ساعت در رتبه دوم بیش‌ترین مقدار نفوذ متوسط قرار گرفت. همچنین حداکثر سرعت نفوذ با مقدار ۳۷/۲ سانتی‌متر در ساعت متعلق به تیپ گیاهی گون-فرفیون و حداقل سرعت نفوذ با مقدار ۲۲/۸ سانتی‌متر در ساعت متعلق به تیپ گیاهی گراس-گون می‌باشد. شکل (۴) مقادیر حداکثر سرعت نفوذ، متوسط سرعت نفوذ و سرعت نفوذ نهایی را بصورت نمودار نشان می‌دهد.

جدول ۴: نتایج آزمون ANOVA بر روی ویژگی‌های نفوذ اندازه‌گیری شده در چهار تیپ گیاهی

ویژگی	منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
نفوذ تجمعی	بین گروه‌ها	۳	۸۰/۹۳	۰/۸۵ns
	خطا	۸	۹۵/۰۶	
حداکثر سرعت نفوذ	بین گروه‌ها	۳	۱۹۱/۷۳	۰/۸۱ns
	خطا	۸	۲۳۶/۵۴	
متوسط سرعت نفوذ	بین گروه‌ها	۳	۸۰/۹۳	۰/۸۵ns
	خطا	۸	۹۵/۰۶	
سرعت نفوذ نهایی	بین گروه‌ها	۳	۸۷/۹۸	۱/۳۰ns
	خطا	۸	۸۴/۷۷	
زمان تا لحظه تثبیت نفوذ	بین گروه‌ها	۳	۰/۰۶۰	۰/۸۵ns
	خطا	۸	۰/۰۷۰	
شیب کاهش نفوذ	بین گروه‌ها	۳	۱۹/۹۱	۰/۰۲۵ns
	خطا	۸	۸۰۸/۹۴	

* اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، و ns عدم اختلاف معنی‌دار را نشان می‌دهند.

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-06-07]

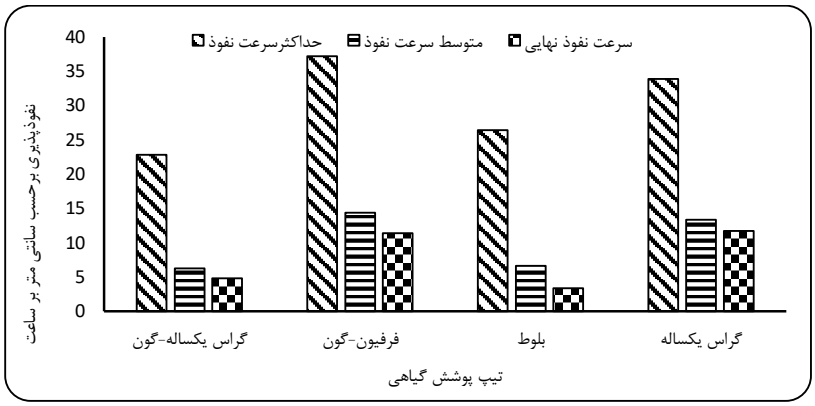
[DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8]

جدول ۵: ویژگی‌های نفوذ اندازه‌گیری شده در تیپ‌های مختلف گیاهی

تیپ پوشش گیاهی	نفوذ تجمعی (Cm) تا زمان۶۰دقیقه	حداکثر سرعت نفوذ (Cm/h)	متوسط سرعت نفوذ (Cm/h)	سرعت نفوذ نهایی (Cm/h)	زمان تا لحظه تثبیت نفوذ (h)	شیب کاهش نفوذ (cm/h^2)
گراس یکساله- گون	۶/۲۵±۰/۶۰ [a]	۲۲/۸±۶ [a]	۶/۲۵±۵/۶۰ [a]	۴/۸±۱/۵۸ [a]	۰/۵±۰/۱۲ [a]	۳۶±۲۱/۰۹ [a]
فرفیون-گون	۱۴/۴±۷/۵ [a]	۳۷/۲±۱۵/۶۰ [a]	۱۴/۴±۷ /۵ [a]	۱۱/۴±۸/۱۴ [a]	۱±۰/۶۳ [a]	۳۰/۹۶±۱۵/۸۴ [a]
بلوط	۶/۶۳±۱/۳۷ [a]	۲۶/۴ ±۹ [a]	۶/۶۳±۱/۳۷ [a]	۳/۳۶±۳/۱۸ [a]	۰/۸۳۳±۰/۵۸ [a]	۲۷/۶۴±۳۷/۰۵ [a]
گراس یکساله	۱۴/۳±۱۲/۶۴ [a]	۳۳/۹±۶/۴۵ [a]	۱۴/۳±۱۲/۶۴ [a]	۱۱/۷±۱۱/۶۱ [a]	۱±۰/۶۳ [a]	۲۲/۲±۳۰/۱۸ [a]

میانگین±انحراف معیار. حروف مشابه غیر معنی‌داری و حروف نامشابه معنی‌داری در سطح ۵ درصد را نشان می‌دهد.

خصوصیات آماری داده‌های مرحله‌ی آموزش و آزمایش فرآیند مدل‌سازی در تیپ‌های گیاهی مختلف در جدول‌های ۶ تا ۹ نشان می‌دهند که بیش‌ترین سرعت نفوذ در تیپ‌های گیاهی بلوط، گون فرفیون، گراس و گون-گراس در مرحله‌ی آموزش به‌ترتیب برابر ۰/۶، ۰/۸۸، ۱/۰۴ و ۰/۴۸ سانتی‌متر در دقیقه برآورد شده است و در مرحله‌ی آزمایش نیز به‌همین ترتیب برابر ۰/۴۶، ۰/۳۴، ۰/۶۵ و ۰/۱ سانتی‌متر در دقیقه مشخص شده است.



شکل ۴: متوسط سرعت نفوذپذیری در تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی

جدول۶: خصوصیات آماری داده‌های مرحله آموزش و مرحله آزمایش بلوط

آموزش							
پارامتر	زمان (دقیقه)	شن (درصد)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	رطوبت (درصد)	وزن مخصوص (gr/cm3)	سرعت نفوذ(سانتی متر بر دقیقه)
حداقل	۰	۳۶/۱۵	۱۳/۷	۴۵	۱/۲۱	۱/۳۱	۰
حداکثر	۴۰	۴۱/۳	۱۵/۵۵	۴۸/۳	۱/۳۵	۱/۸۷	۰/۶
میانگین	۱۴/۴۱	۳۸/۵۷	۱۴/۶۷	۴۶/۷۴	۱/۲۸	۱/۵۱	۰/۱۷
انحراف معیار	۱۱/۸۶	۲/۵۶	۰/۹۲	۱/۶۴	۰/۰۶	۰/۱۷	۰/۱۴
آزمایش							
پارامتر	زمان (دقیقه)	شن (درصد)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	رطوبت (درصد)	وزن مخصوص (gr/cm3)	سرعت نفوذ(سانتی متر بر دقیقه)
حداقل	۴۰	۲۶	۷/۶۳	۳۱/۹۸	۱/۲۸	۱/۳۱	۰/۰۵
حداکثر	۷۰	۵۹/۴۰	۳۵/۵۵	۵۴/۳۳	۲۰/۴۱	۱/۸۷	۰/۴۶
میانگین	۵۰/۸۰	۴۵/۷۷	۱۴/۴۰	۳۹/۷۷	۴/۷۸	۱/۵۱	۰/۱۷
انحراف معیار	۹/۰۹	۱۱/۴۵	۸/۵۱	۷/۸۳	۶/۹۷	۰/۱۸	۰/۱۳

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-06-07]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8]

جدول ۷: خصوصیات آماری داده‌های مرحله آموزش و مرحله آزمایش گون فرفیون

پارامتر	زمان (دقیقه)	شن (درصد)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	رطوبت (درصد)	وزن مخصوص (gr/cm3)	سرعت نفوذ(سانتی متر بر دقیقه)
آموزش							
حداقل	۰	۲۹	۱۵/۷	۴۹/۳	۱/۳۲	۱/۳۲	۰
حداکثر	۴۰	۳۵	۱۹/۷	۵۱/۳	۱/۵۲	۱/۶۷	۰/۸۸
میانگین	۱۳/۶۶	۳۱/۸	۱۷/۸۳	۵۰/۳۶	۱/۴۱	۱/۵	۰/۲۶
انحراف معیار	۱۱/۸۶	۲/۹۹	۱/۹۹	۰/۹۹	۰/۰۹۸	۰/۱۷۱	۰/۲۳
آزمایش							
پارامتر	زمان (دقیقه)	شن (درصد)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	رطوبت (درصد)	وزن مخصوص (gr/cm3)	سرعت نفوذ(سانتی متر بر دقیقه)
حداقل	۴۰	۲۹	۱۵/۷	۴۹/۳	۱/۳۲	۱/۳۲	۰/۱
حداکثر	۷۰	۳۵	۱۹/۷	۵۱/۳	۱/۵۲	۱/۶۷۵	۰/۳۴
میانگین	۵۷/۱۴	۳۲/۴۲	۱۷/۴۱	۵۰/۱۵	۱/۴۳	۱/۴۷۲	۰/۲۱
انحراف معیار	۱۰/۳۰	۲/۹۶	۱/۹۷	۰/۹۸	۰/۰۹۷	۰/۱۷۵	۰/۰۹۸

جدول ۸: خصوصیات آماری داده‌های مرحله آموزش و مرحله آزمایش گراس

پارامتر	زمان (دقیقه)	شن (درصد)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	رطوبت (درصد)	وزن مخصوص (gr/cm3)	سرعت نفوذ(سانتی متر بر دقیقه)
آموزش							
حداقل	۰	۲۶	۸/۲	۲۹	۱/۲۹	۱/۱۰۴	۰
حداکثر	۳۰	۵۷	۳۵/۵۵	۳۸/۴۵	۳/۵۸	۱/۷۰۶	۱/۰۴
میانگین	۱۱/۷۸	۴۷/۴۱	۱۷/۶۹	۳۴/۸۹	۲/۰۲	۱/۴۵۷	۰/۲۸
انحراف معیار	۹/۸۸	۱۲/۴۳	۱۰/۶۱	۳/۳۱	۰/۶۸	۰/۱۹۲	۰/۲۸
آزمایش							
پارامتر	زمان (دقیقه)	شن (درصد)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	رطوبت (درصد)	وزن مخصوص (gr/cm3)	سرعت نفوذ(سانتی متر بر دقیقه)
حداقل	۴۰	۲۶	۸/۲	۲۹	۱/۲۹	۱/۱۰۴	۰/۰۴
حداکثر	۷۰	۵۷	۳۵/۵۵	۳۵/۴۸	۳/۵۸	۱/۷۰۶	۰/۶۵
میانگین	۵۰/۸	۴۷/۷۹	۱۷/۵۴	۳۴/۶۵	۲/۰۹	۱/۴۵۴	۰/۱۹
انحراف معیار	۸/۹۰	۱۲/۳۳	۱۰/۴۲	۳/۲۸	۰/۷۴	۰/۱۹۲	۰/۱۸

جدول ۹: خصوصیات آماری داده‌های مرحله آموزش و مرحله آزمایش گون-گراس

پارامتر	زمان (دقیقه)	شن (درصد)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	رطوبت (درصد)	وزن مخصوص (gr/cm3)	سرعت نفوذ(سانتی متر بر دقیقه)
آموزش							
حداقل	۰	۳۷/۱۲	۸/۵۵	۵۴/۳۳	۱/۸۲	۱/۸۶۸	۰
حداکثر	۴۰	۳۷/۱۲	۸/۵۵	۵۴/۳۳	۱/۸۸	۱/۸۶۸	۰/۴۸
میانگین	۱۳/۶۶	۳۷/۱۲	۸/۵۵	۵۴/۳۳	۱/۸۵	۱/۸۷	۰/۱۴
انحراف معیار	۱۱/۸۶	۰	۰	۰	۰/۰۲۷	۰/۰۰۰	۰/۱۲
آزمایش							
پارامتر	زمان (دقیقه)	شن (درصد)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	رطوبت (درصد)	وزن مخصوص (gr/cm3)	سرعت نفوذ(سانتی متر بر دقیقه)
حداقل	۴۰	۳۷/۱۲	۸/۵۵	۵۴/۳۳	۱/۸۲	۱/۸۶۸	۰/۰۶
حداکثر	۷۰	۳۷/۱۲	۸/۵۵	۵۴/۳۳	۱/۸۸	۱/۸۶۸	۰/۱
میانگین	۵۷/۱۴	۳۷/۱۲	۸/۵۵	۵۴/۳۳	۱/۸۶	۱/۸۷	۰/۰۷۷
انحراف معیار	۱۰/۳۰	۰	۰	۰	۰/۰۲۷	۰/۰۰۰	۰/۰۱۹

نتایج مدل‌سازی تیپ‌های گیاهی بلوط، گون، گراس و گراس-گون با استفاده از مدل‌های RF، MLP، GP-PUK، GP-RBF، SVM-PUK و SVM-RBF نشان می‌دهد که تقریبا تمامی مدل‌ها نتایج خوبی از خود نشان داده‌اند (جدول ۱۰) و باتوجه به معیارهای ارزیابی CC، RMSE و MAE در تیپ‌های بلوط و گون مدل GP-PUK نسبت به

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-06-07]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8]

سایر مدل‌ها عملکرد بهتری داشته که نتایج باتوجه به معیارهای ارزیابی به‌ترتیب گفته شده در بخش آزمایش مدل در تیپ بلوط برابر ۰/۹۷، ۰/۱۰۴ و ۰/۰۹۶ تعیین شده و در تیپ گون نیز به همین ترتیب برابر ۰/۹۸، ۰/۰۸۱ و ۰/۰۶۰ برآورد شده است. همچنین در تیپ‌های گراس و گراس-گون باتوجه به معیارهای ارزیابی مدل RF به‌عنوان مدل برتر انتخاب شده است که نتایج معیارهای ارزیابی به‌ترتیب در بخش آزمایش تیپ گراس برابر ۰/۸۳، ۰/۱۰۲ و ۰/۰۶۴ مشخص شده و در بخش آزمایش تیپ گراس-گون نیز به‌همین ترتیب برابر ۰/۹۹، ۰/۰۰۵۲ و ۰/۰۰۴۴ به‌دست آمده است.

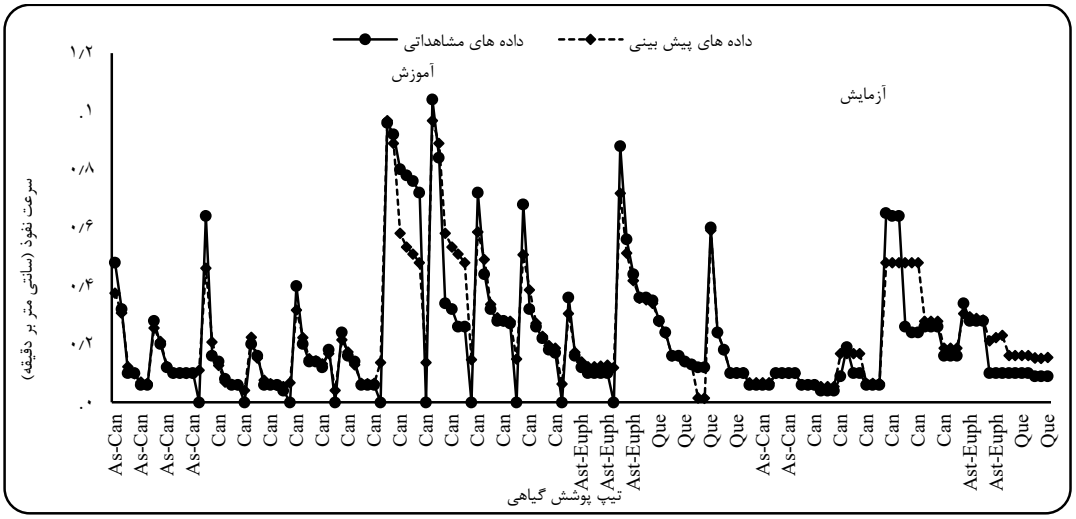
جدول ۱۰: معیارهای سنجش خطا برای مدل‌های مختلف در تیپ‌های گیاهی مورد مطالعه

تیپ گیاهی	مدل	آموزش			آزمایش		
		C.C	RMSE	MAE	C.C	RMSE	MAE
بلوط	RF	۰/۸۷۳۳	۰/۰۷۷۲	۰/۰۴۷۴	۰/۹۹۹۹	۰/۰۲۹	۰/۰۲۹
	Gp_PUK	**۰/۹۹۹۹**	**۰/۰۰۲۸**	**۰/۰۰۲۸**	**۰/۹۷۲**	**۰/۱۰۴۱**	**۰/۰۹۶**
	Gp_RBF	۰/۹۰۳۵	۰/۰۶۱۵	۰/۰۳۶۲	۰/۸۱۸۱	۳/۷۴۹۷	۳/۱۳۲
	MLP	۰/۴۸۱۶	۰/۱۲۸	۰/۰۸۶۵	۰/۹۹۸	۰/۱۰۰۶	۰/۰۸۷۸
	SVM-PUK	۰/۹۸۲۵	۰/۰۳۸۸	۰/۰۱۰۶	۰/۹۵۹۶	۰/۰۹۵۶	۰/۰۸۶۳
	SVM-RBF	۰/۴۳۰۶	۰/۱۲۹۱	۰/۰۷۲۳	۰/۹۶۳۹	۰/۱۰۶۵	۰/۰۹۴۷
گون-فرفیون	RF	۰/۹۰۴۹	۰/۱۰۴	۰/۰۴۲	۰/۹۷۹۹	۰/۰۵۳۱	۰/۰۳۷۵
	Gp_PUK	**۰/۹۹۲۴**	**۰/۰۵۹۶**	**۰/۰۴۱۴**	**۰/۹۸۴۵**	**۰/۰۸۱**	**۰/۰۶۰۹**
	Gp_RBF	۰/۹۹۲۴	۰/۰۵۹۶	۰/۰۴۱۴	۰/۹۸۴۵	۰/۰۸۱	۰/۰۶۰۹
	MLP	۰/۶۳۲۳	۰/۱۸۱۷	۰/۱۱۳۶	۰/۹۹۰۳	۰/۰۶۱۶	۰/۰۵۵
	SVM-PUK	۰/۹۹۹۷	۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۳	۰/۹۸۴۹	۰/۰۷۲۸	۰/۰۴۳
	SVM-RBF	۰/۷۲۳۶	۰/۱۶۰۷	۰/۰۷۶۷	۰/۷۱۱۷	۰/۰۹۱۷	۰/۰۸۷۸
گراس	**RF**	**۰/۹۲۸۸**	**۰/۱۰۸۱**	**۰/۰۶۹۷**	**۰/۸۳۹۹**	**۰/۱۰۲۵**	**۰/۰۶۴۸**
	Gp_PUK	۰/۹۴۹۴	۰/۰۸۹۵	۰/۰۳۶۴	۰/۷۶۸۵	۰/۱۶۴۸	۰/۱۲۹۸
	Gp_RBF	۰/۶۴۷۱	۰/۲۲۷۱	۰/۱۷۳۶	۰/۷۹۲۴	۰/۱۵۴۷	۰/۱۳۷۳
	MLP	۰/۶۵۱۸	۰/۲۱۶۸	۰/۱۴۷۱	۰/۸۲۸۹	۰/۱۳۸۷	۰/۱۲۷۴
	SVM-PUK	۰/۹۱۹۱	۰/۱۲۱۷	۰/۰۴۵۵	۰/۷۲۱۹	۰/۱۶۳۸	۰/۱۱۰۱
	SVM-RBF	۰/۶۷۷	۰/۲۱۴۵	۰/۱۲۰۲	۰/۵۵۰۷	۰/۱۶۳۸	۰/۱۰۱۶
گراس-گون	**RF**	**۰/۹۴۱۱**	**۰/۰۵۰۸**	**۰/۰۲۸۱**	**۰/۹۹۹۹**	**۰/۰۰۵۲**	**۰/۰۰۴۴**
	Gp_PUK	۰/۹۹۹۱	۰/۱۲۴۱	۰/۰۹۴۹	۰/۶۹۹۸	۰/۰۶۷۲	۰۶۴۲
	Gp_RBF	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۲	۰/۸۶۲۶	۱۰/۶۹۷۲	۹/۲۴۶۴
	MLP	۰/۳۹۸۷	۰/۱۱۵۱	۰/۰۸۶	۰/۴۶۹۲	۰/۲۵۸۸	۰/۲۴۱
	SVM-PUK	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۴	۰/۷۰۲۳	۰/۰۶۶۷	۰/۰۶۳۷
	SVM-RBF	۰/۶۶۳۷	۰/۰۹۴۹	۰/۰۵۳۹	۰/۶۹۹۴	۰/۰۱۷۸	۰/۰۱۳۶

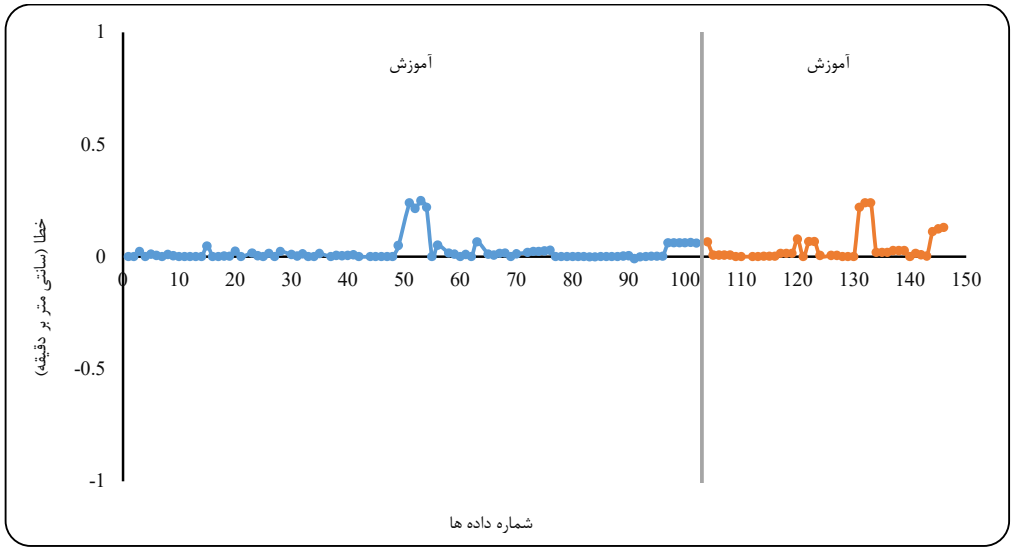
نمودارهای داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی و همچنین نمودار خطا در مرحله آموزش و آزمایش مدل برتر در همه تیپ‌های گیاهی در شکل‌های (۵ و ۶) نشان داده شده‌اند.

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-06-07]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8]



شکل ۵: نمودارداده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی مدل بهینه تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی



شکل ۶: نمودارداده‌های خطای مدل بهینه تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی

بحث و نتیجه‌گیری

وضعیت نفوذپذیری خاک نشان دهنده چگونگی رفتار خاک در برابر آب رسیده به سطح خاک است. میزان نفوذ آب به خاک، مهم‌ترین منبع تامین‌کننده آب برای حیات گیاهان است که نقش اساسی در کنترل آب‌های سطحی و زیرزمینی دارد. لذا دست‌یابی به مدل بهینه‌ای که بتواند با دقت قابل قبول، به تخمین میزان نفوذپذیری خاک بپردازد، از اهمّیت ویژه‌ای برخوردار است و ابزاری برای ارزیابی مشکلات محیطی و کشاورزی هستند. بر این اساس هدف در این تحقیق به مدل‌سازی نفوذپذیری در تیپ‌های مختلف پوشش گیاهی شامل بلوط، گون-فرفیون، گراس و گراس-گون با استفاده از برخی مدل‌های یادگیری شامل RF، MLP، GP و SVM باکرنل‌های PUK و RBF در حوزه‌ی آبخیز الشتر پرداخته شده است. به‌همین منظور در این پژوهش ابتدا برخی خصوصیات خاک شامل درصد رس، سیلت، شن، تخلخل، آهک، رطوبت، ماده‌آلی و وزن مخصوص برای تیپ‌های مختلف خاک مشخص شد و بر اساس نتایج به‌دست آمده فقط درصد سیلت در تیپ‌های

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-06-07]
[DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8]

مختلف خاک تفاوت معنی‌داری دارد که در تیپ گون-گراس دارای بیش‌ترین درصد سیلت و تیپ گراس کم‌ترین درصد سیلت را دارا است. در ادامه ویژگی‌های مختلف نفوذ شامل حداکثر و متوسط سرعت نفوذ، سرعت نهایی نفوذ و شیب کاهش نفوذ مورد بررسی قرار گرفت که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان نفوذ متوسط به‌ترتیب مربوط به تیپ‌های گون فرفیون و گراس-گون بوده و مطابق آزمون ANOVA نفوذ متوسط در تیپ‌های مختلف تفاوت معنی‌داری نداشت. در ادامه خصوصیات آماری داده‌های آموزش و آزمایش تعیین شد و سپس با استفاده از مدل‌های استفاده شده به مدل‌سازی نفوذ پرداخته شد. عملکرد مدل‌های ذکرشده با استفاده از معیارهای ارزیابی CC، RMSE و MAE ارزیابی شده است. نتایج نشان داد همه‌ی مدل‌ها در تیپ‌های مورد بررسی تقریباً عملکرد خوبی از خود نشان داده‌اند که در تیپ‌های گون و بلوط مدل GP-PUK باتوجه به معیارهای ارزیابی مدل برتر انتخاب شد که این نتایج در بخش آموزش تیپ بلوط به‌ترتیب معیارهای ارزیابی برابر ۰/۹۹، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۲ و در بخش آزمایش همین تیپ برابر ۰/۹۷، ۰/۱۰۴ و ۰/۰۹۶ بوده و در تیپ گون نتایج برای همین مدل در بخش آموزش به‌ترتیب برابر ۰/۹۹، ۰/۰۵۹ و ۰/۰۴۱ و در بخش آزمایش نیز برابر ۰/۹۸، ۰/۰۸۱ و ۰/۰۶۰ به‌دست آمده است. در تیپ‌های گراس و گراس-گون از بین مدل‌های ذکر شده RF به‌عنوان مدل برتر انتخاب شد. در تیپ گراس بخش آموزش نتایج به‌ترتیب برابر ۰/۹۲، ۰/۱۰۸ و ۰/۰۶۹ بوده و در بخش آزمایش نتایج ۰/۸۲، ۰/۱۰۲ و ۰/۰۶۴ مشخص شده است. در نهایت در تیپ گراس-گون نتایج برای مدل RF باتوجه به معیارهای ارزیابی به‌ترتیب در بخش آموزش برابر ۰/۹۴، ۰/۵۰۸ و ۰/۰۲۸ بوده و در بخش آزمایش همین تیپ به‌ترتیب برابر ۰/۹۹، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۴ برآورد شده است. در نهایت نتایج نشان داد مدل‌های استفاده شده در برآورد سرعت نفوذ در تیپ‌های مورد برسی از عملکرد خوبی برخوردار بوده‌اند. نتایج تحقیق سلیمانی و همکاران (۱۴۰۱) در مدل‌سازی نفوذ با استفاده از مدل‌های GP و SVM (با کرنل‌های PUK و RBF)، MLP و RF در بافت‌های مختلف خاک نشان دهنده برتری مدل RF نسبت به سایر مدل‌های به‌کار برده شده در مدل‌سازی نفوذپذیری بافت‌های مختلف خاک بوده است که با نتایج به‌دست آمده در این تحقیق همخوانی دارد. سیهاگ و همکاران (۲۰۲۰) به مدل‌سازی روند نفوذ با تکنیک‌های محاسبات نرم‌افزاری پرداختند. آن‌ها در این تحقیق از شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN) برای تخمین میزان نفوذ خاک استفاده کردند. همچنین از یک مجموعه حاوی ۱۵۵ داده برای تهیه الگوریتم‌های مختلف و آزمایش مدل‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد با این‌که مدل‌های GRNN، GP و GEP عملکرد تخمینی خوبی را ارائه داده‌اند اما مدل ANN با ضریب همبستگی (C.C) در مراحل آموزش و آزمایش به‌ترتیب برابر ۰/۹۸۱۶ و ۰/۹۱۳۳ بهترین عملکرد را داشته است. نتایج تحقیقات انجام شده توسط سیهاگ و همکاران (۲۰۱۹) در رابطه با بررسی روند نفوذ آب در خاک مناطق خشک ایران با استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی، با استفاده از مدل‌های سیستم نرون فازی انطباقی، مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) و جنگل تصادفی (RF) که برای اندازه‌گیری نفوذ از دبل رینگ استفاده کردند نشان داد مدل SVM با بیش‌ترین مقدار ضریب همبستگی (C.C) بهترین عملکرد را داشته است و با نتایج به دست آمده در این تحقیق که برتری RF را نسبت به سایر مدل‌ها نشان داده است، مقایرت دارد. سپه‌وند و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیقات خود مبنی بر، بررسی و مقایسه کارایی مدل‌های نفوذ به نتایجی دست یافتند که با نتایج این تحقیق یکسان نبود. آن‌ها در تحقیق خود بعد از اندازه‌گیری نفوذ با دبل رینگ به مدل‌سازی نفوذ با مدل‌هایی همچون کوستیاکوف، کوستیاکوف اصلاح‌شده، نول و فیلیپ پرداختند. نتایج نشان داد که مدل نول از کارایی بالاتری نسبت به بقیه برخوردار است. در بخش دوم تحقیق از مدل‌های MLR، GP و SVM برای مدل‌سازی نفوذ استفاده شد که نتایج این بخش حاکی از کارایی بالاتر مدل SVM-PUK نسبت به دیگر مدل‌ها برای پیش بینی میزان نفوذ آب بود. در مجموع با توجه به نتایج این تحقیق و با بررسی نتایج به دست آمده از تحقیقات پیشین می‌توان به این نتیجه رسید که در رابطه با موضوع مدل‌سازی نفوذپذیری خاک در تیپ‌های پوشش گیاهی مختلف، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین به‌ویژه فرآیند گوسی (GP) و مدل جنگل تصادفی (RF) کاربرد داشته و می‌توان در بازه‌های زمانی متفاوت و حوضه‌های

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-06-07]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8]

مطالعاتی مختلف، از این مدل‌ها به منظور برآورد میزان نفوذپذیری و همچنین تخمین روانآب منطقه استفاده کرد.

References

1. Abdel–Majid, A.H., M.J. Trilica & R.H. Hart., 1987. Soil and vegetation responses simulated trampling. J. Range management (USA), 40: 303-306.
2. Agha Beige Amin, S. & B. Fattahi., 2017. Investigation of the effect of vegetation and some soil properties on the hydrological behavior of watersheds. Journal of Rangeland, 11(1): 83-92. (In Persian)
3. Breiman, L., 1996. Bagging predictors. Machin Learning, 24(2): 123–140.
4. Diaz-Alvarez, A., F. Serradilla, J.E. Naranjo, J.J. Anaya & F. Jimenez., 2014. Modeling the driving behavior of electric vehicles using smartphones and neural networks. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 6(3): 44-53.
5. Donohue, R.J., M.L. Roderick & T.R. McVicar., 2007. On the importance of including vegetation dynamics in Budyko's hydrological model. Hydrology and Earth System Sciences, 11(2): 983–995.
6. Duan, I., M. Huang & L. Zhang., 2016. Differences in hydrological responses for different vegetation types on a steep slope on the Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 537: 356-366.
7. Ghayomi Mohammadi, A.M., Sh. Ghorbani Dashtaki, F. Raiesi & P. Tahmasbi., 2013. Effect of land abandonment on variation of soil water infiltraition parameters. Journal of soil and water Resources conservation, 2(4): 41-51. (In Persian).
8. Gomez H, T. Kavzoglu & P. Mather., 2002. Artificial neural network application in landslide hazard zonation in the Venezuelan Andes. Abstracts of 15th International Conference on Geomorphology, Tokyo, Japan, 23-28.
9. Hassanvand, Sh., A. Sepehvand, F. Ternian & P. Sihag., 2021. Examining changes in permeability and evaluating its models in different plant types (Case study: Al-Shatar watershed, Lorestan). Journal of Rangeland,15(3): 477-493.
10. Hoseini, S.A., M. Tavan & H. Eisaei., 2011. Investigation on water infiltration of different vegetation types in saline and alkali rangelands of Inchehbroon, Golestan province. Iranian journal of Range and Desert Reseach, 18(2): 191-280. (In Persian)
11. Hsu, S.M., C.F. NI & P.F. Hung., 2002. Assessment of three infiltration formulas based on model fitting and Richards equation. Journal of Hydrology Engineering, 7(5): 373-379.
12. Pal, M., 2005. Random forest classifier for remote sensing classification. International Journal of Remote Sensing, 26(1): 217-222.
13. Pal, M. & S. Deswal., 2010. Modelling pile capacity using Gaussian process regression. Computer. Geotechnical, 37: 942-947.
14. Pingping, H., Sh. Xue, L. Peng & L. Zhanbin., 2013. Effect of Vegetation Cover Types on Soil Infiltration under Simulating Rainfall. Nature Environment and Pollution Technology, 12(2): 193-198.
15. Prasad, A.M., L.R. Iverson & A. Liaw, 2006. Newer classification and regression tree techniques: Bagging and random forests for ecological prediction. Ecosystems, 9(2): 181-199.
16. Sadikhani, M.R. & A. Sohrabi., 2017. Effect of land use on the performance of selected soil water infiltration models. Journal of Soil Management and Sustainable Production, 7(1): 127-138. (In Persian)
17. Saidian, H. & H.R. Moradi., 2019. Determining the most important factors affecting the permeability of soil made of gypsum and aghajari formations in different uses. Watershed research (Research and Construction), 23(2): 97-109. (In Persian)
18. Samadianfard, S., M. Salarifar, S. Javidan & F. Mikaeili, 2020. Estimation of Daily Reference Evapotranspiration in Humid Climates Using Data-Driven Methods of Gaussian Process Regression, Support Vector Regression and Random Forest. Environment and Water Engineering, 6(4): 360-373. (In Persian)
19. Sepahvand, A., P. Sihag, B. Singh & M. Zand, 2018. Comparative evaluation of infiltration models. KSCE Journal, 22: 4173-4184.
20. Sepahvand, A., M. Taei Semiromi, S.K. Mirnia & H.R. Moradi, 2011. Assessing the Sensitivity of Infiltration Models to Variability of Soil Moisture. Journal of Water and Soil, 25(2): 338-346. (In Persian)
21. Sepehvand, A. & Z. Azizi Najafkali, 2019. Suspended sediment modeling using Gaussian process and multi-layer perceptron models 15th National conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran, 15, 1-6. (In Persian).
22. Sihag P., B. Singh, A. Sepahvand & V. Mehdipour., 2020. Modeling the infiltration process with soft computing techniques, ISH Journal of Hydraulic Engineering, 26(2): 138-152.

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-06-07]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8]

23. Sihag, P., V.P. Singh, A. Angelaki, V. Kumar, A. Sepahvand & E. Golia., 2019: Modelling of infiltration using artificial intelligence techniques in semi-arid Iran. Hydrological Sciences Journal, 64(13):1647-1658.
24. Soleimani, L., B. Mir Derikvand & A. Sepahvand, 2022. Modelling of Infiltration Rate in Different Soil Textures using Soft Computing Techniques in Kashkan Watershed, Lorestan Province. Watershed research, 35(4): 104-116. (In Persian).
25. Sonaje, N.P.m, 2013. Modeling of Infiltration Process – A Review. Indian Journal of Applied Research, 3(9): 226-230.
26. Thurow, T.L., W.H. Blackburn & C.A. Taylor, 1986. Hydrologic characteristics of vegetation types as affected by livestock grazing systems, Edwards Plateau, Texas. Journal of Range Mangement, 39: 505-509.
27. Tokar A.S. & M. Markus., 2000. Precipitation-runoff modeling using artificial neural networks and conceptual models. Journal of Hydrology Engineering, 5: 156-161.
28. Vafakhah, M., M. Mohsani Saravi, M. Mahdavi & S.K. Alavi Panah., 1387. The application of geostatistics in estimating the depth and density of electricity in the Orazan watershed. Iranian Journal of Watershed Science and Engineering, 2(4): 49-55.
29. Ward, A.D. & S.W. Trimble., 2004. Environmental Hydrology. Second Edition, CRC Press LLC, Pp 475.
30. Yang, D., X. Zhang, R. Pan, Y. Wang & Z. Chen, 2018. A novel Gaussian process regression model for state-of-health estimation of lithium-ion battery using charging curve. Journal of Power Sources, 384: 387-39.
31. Ye, S., H.Y. Li, S. Li, L.R. Leung, Y. Demissie & Q. Ran., 2015. Vegetation regulation on streamflow intra-annual variability through adaption to climate variations. Geophysical Research Letters, 42(23): 10307–10315.
32. Zhou, X., H.S. Lin & E.A. White, 2008. Surface soil hydraulic properties in four soil series under different land uses and their temporal changes. Catena, 73(2): 180 188.

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2025-06-07]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.4.6.8]