



پژوهش‌های آبخیزداری

۱۴۶

شماره پیاپی ۱۴۶، بهار ۱۴۰۴

دوره ۳۸، شماره ۱

- ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین و دست‌والعمل‌های بهینه‌سازی برای پیش‌بینی آب‌دهی رود کشکان
فاطمه عوض پور، محمدرضا هادیان، علی طالبی ۱
- تعیین کمی سهم خشک‌سالی و عامل‌های انسانی بر افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان کوه‌دشت استان لرستان
رضا چمن‌پیرا، مهران زند، ابراهیم کریمی سنگچینی، الهام داودی ۱۹
- بررسی اثرات خشک‌سالی روی الگوی زمانی تغذیه آبخوان‌ها در آبخیز دامغان رود مهین خسروی، محمدرضا یزدانی ۳۸
- تأثیر تغییرات سنجه‌های اقلیمی بر تحرک و پایداری تپه‌های ماسه‌ای در آبخیز دریاچه ارومیه، ایستگاه مهاباد
احمد نجفی ایگدیر، علیرضا مجیدی ۶۱
- پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر فرساینده‌های باران در آبخیز تالار استان مازندران، ایران
شمیم احمدی، عطا اله کاویان، کریم سلیمانی، کاکا شاهدهی، عبدالواحد خالدی درویشان ۷۸
- بازآفرینی شاخص پایداری آبخیز بر اساس چارچوب محرک-فشار-وضعیت-اثر-پاسخ در آبخیز بهشت‌آباد
رفعت زارع بیدکی، شاهین درخشان، سیامک خیبری، هنریک چاوز ۹۶
- بررسی عامل‌های مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن با استفاده از مدل دمپستر-شفر در آبخیز مزلقان‌چای میانی، استان مرکزی
سهیلا روشن ضمیر ۱۱۳
- پیش‌بینی رسوبات معلق با استفاده از مدل ترکیبی منحنی سنجه رسوب و شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه نارون افجه
گلاره غفاری ۱۲۸

نشریه علمی "پژوهش‌های آبخیزداری"

صاحب امتیاز: سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس

دوره ۳۸، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۴۶، بهار ۱۴۰۴

درجه علمی پژوهشی این نشریه به استناد نامه شماره ۳/۱۸/۱۹۲۹۱۶ به تاریخ ۱۳۹۶/۰۸/۲۲ مورد تأیید وزارت علوم، تحقیقات و فناوری قرار گرفته است. همچنین این نشریه دارای پروانه انتشار به شماره ۱۶۱۹۹ مورخ ۱۴۰۰/۰۴/۲۸ از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی می‌باشد.

مدیر مسئول: ابوالفتح مرادی، استادیار بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
سردبیر: علی اکبر نوروزی، استاد پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

اعضای هیأت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

امیر حمزه حقی آبی، استاد گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان
داور خلیلی، استاد بخش مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
محمدتقی دستورانی، استاد گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد
محمد زارع، استاد بخش علوم زمین دانشکده علوم دانشگاه شیراز
سیدمسعود سلیمان پور، دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
مجید صوفی، دانشیار بازنشسته بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
سیدیوسف عرفانی فرد، دانشیار گروه سنجش از دور و GIS دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران
عطا الله کاویان، استاد گروه آبخیزداری دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری
علی اکبر نوروزی، استاد پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
مدیر داخلی: سید مسعود سلیمان پور، دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
ویراستار و کارشناس اداری: مریم عنایتی، کارشناس ارشد بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
کارشناس آماری: لادن جوکار، مربی بازنشسته مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی شیراز، ایران
صفحه آرا: پارسا حقیقی، کارشناس ارشد بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

این نشریه در پایگاه‌های استنادی علوم جهان اسلام (ISC) با ISSN ۲۹۸۱-۲۰۳۸ به نشانی <https://isc.gov.ir>، نظام نمایه سازی

مرکز منطقه‌ای اطلاع رسانی علوم و فناوری (RICeST) به نشانی <https://ricest.ac.ir> ایران ژورنال www.sid.ir

و www.magiran.com نمایه می‌شود.

نشریه در رد ویرایش نوشته‌ها و یا خلاصه کردن آنها آزاد است.

استفاده از تصویرهای نشریه با ارجاع به نشریه آزاد است.

نشانی: شیراز بلوار، مدرس خیابان جانبازان نبش استاد مردانی غربی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، دفتر نشریه پژوهش‌های آبخیزداری

صندوق پستی: ۷۱۵۵۵-۶۱۷

دورنگار: ۳۷۲۰۶۳۷۶ (۰۷۱)

رایانامه: wmrj@areeo.ac.ir

کدپستی: ۷۱۵۵۸-۶۳۵۱۱

تلفن: ۳۷۲۰۴۹۵۹ (۰۷۱) داخلی - ۲۲۴

تارنما: <http://wmrj.areeo.ir>



مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

شماره ۱۴۶، بهار ۱۴۰۴

فهرست

ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین و دستوالعمل‌های بهینه‌سازی برای پیش‌بینی آب‌دهی رود کشکان

فاطمه عوض پور، محمدرضا هادیان، علی طالبی ۱

تعیین کمی سهم خشک‌سالی و عامل‌های انسانی بر افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان کوه‌دشت استان لرستان

رضا چمن‌پیرا، مهران زند، ابراهیم کریمی سنگچینی، الهام داودی ۱۹

بررسی اثرات خشک‌سالی روی الگوی زمانی تغذیه آبخوان‌ها در آبخیز دامغان‌رود

مهین خسروی، محمدرضا یزدانی ۳۸

تأثیر تغییرات سنجه‌های اقلیمی بر تحرک و پایداری تپه‌های ماسه‌ای در آبخیز دریاچه ارومیه، ایستگاه مهاباد

احمد نجفی ایگدیر، علیرضا مجیدی ۶۱

پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر فرساینده‌های باران در آبخیز تالار استان مازندران، ایران

شمیم احمدی، عطا اله کاویان، کریم سلیمانی، کاکا شاهی، عبدالواحد خالدی درویشان ۷۸

بازآفرینی شاخص پایداری آبخیز بر اساس چارچوب محرک-فشار-وضعیت-اثر-پاسخ در آبخیز بهشت‌آباد

رفعت زارع بیدکی، شاهین درخشان، سیامک خیبری، هنریک چاوز ۹۶

بررسی عامل‌های مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن با استفاده از مدل دمپستر- شفر در آبخیز مزلقان‌چای میانی، استان مرکزی

سهیلا روشن ضمیر ۱۱۳

پیش‌بینی رسوبات معلق با استفاده از مدل ترکیبی منحنی سنجه رسوب و شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه نارون افجه

گلاره غفاری ۱۲۸



مرکز تحقیقات، آموزش و توسعه کشاورزی و منابع طبیعی همدان

پژوهش‌های آب‌نخرداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مجله تحقیقات، آموزش و توسعه کشاورزی

ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین و دستورالعمل‌های بهینه‌سازی برای پیش‌بینی آب‌دهی رود کشکان

فاطمه عوض‌پور^۱، محمدرضا هادیان^{۲*}، علی طالبی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۳- استاد دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

شبیه‌سازی آب‌دهی رود در ایستگاه‌های آب‌سنجی به‌منظور آگاهی از آب‌دهی رود در دوره‌های زمانی آینده از مسائل مهمی است که معمولاً به‌وسیله سری‌های زمانی آب‌شناختی مرتبط با همان ایستگاه انجام می‌شود. به‌منظور پیش‌بینی آب‌دهی رود با بیشترین دقت از سه گروه بزرگ شامل روش‌های تجربی و آماری، مفهومی و فرایند-محور استفاده می‌شود. از جمله روش‌های داده-محور، روش‌های مبتنی بر پایه هوش مصنوعی هستند. هدف این پژوهش، بررسی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین شامل: SVM و ANFIS، ANN و بررسی عملکرد مدل آموزش داده‌شده شبکه عصبی با دستورالعمل‌های بهینه‌سازی نهنگ (WOA) و دستورالعمل ازدحام ذرات (PSO) در پیش‌بینی آب‌دهی رود بود. افزون بر ارزیابی مدل‌های هوشمند، تأثیر استفاده از دستورالعمل‌های بهینه‌سازی بر دقت پیش‌بینی آب‌دهی رود بررسی شد. از آنجایی که برای استفاده از مدل‌های داده-محور، داده‌های ورودی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد مدل‌ها دارند، از این‌رو سنجه‌های مؤثر بر آب‌دهی رود مشخص شد و بهترین ترکیب متغیرهای ورودی برای هر مدل تعیین شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به‌منظور پیش‌بینی آب‌دهی روزانه در ایستگاه آب‌سنجی پل دختر واقع بر رود کشکان، داده‌های آب‌دهی رود و بارش مربوط به سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۵۰ تهیه شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mr_hadian@yazd.ac.ir

استناد: عوض‌پور، ف.، هادیان، م.ر.، طالبی، ع. ۱۴۰۴. ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین و دستورالعمل‌های بهینه‌سازی در پیش‌بینی آب‌دهی رود کشکان. پژوهش‌های آب‌نخرداری، ۳۸(۱): ۱۸-۱.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2024.365128.1579

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

پژوهش‌های آب‌نخرداری، سال ۱۴۰۴، دوره ۳۸، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۴۶، بهار ۱۴۰۴، صفحه‌های ۱ تا ۱۸.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



از مدل‌های هوشمند ساختار استنتاج فازی عصبی (ANFIS) و ساختار بردار پشتیبان (SVM)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، مدل ترکیبی شبکه عصبی و دستورالعمل ازدحام ذرات (ANN-PSO) و مدل ترکیبی شبکه عصبی و دستورالعمل نهنگ (ANN-WOA) استفاده شد.

در دو مدل ترکیبی تلاش شد که سنج‌های شبکه عصبی با استفاده از دستورالعمل‌های فراابتکاری تنظیم شوند و تأثیر آن بر عملکرد مدل ANN بررسی شود. همچنین، در این پژوهش، تأثیر داده‌های آب‌دهی رود و بارش همراه با تأخیرهای زمانی (داده‌های مربوط به روزهای گذشته) و ترکیبی از این سنج‌ها به‌عنوان ورودی مدل‌ها بررسی شد. به‌منظور تعیین بهترین ترکیب متغیرهای ورودی، روش‌های آماری تابع همبستگی خودکار (ACF) و تابع همبستگی خودکار جزئی (PACF) و ضریب همبستگی پیرسون (PCC) به‌کارگرفته شد. پس از اعمال ورودی‌های مؤثر و آموزش مدل‌های هوشمند نامبرده، با مقایسه اندازه‌های $RMSE$ ، R^2 و NE ، عملکرد آن‌ها در پیش‌بینی آب‌دهی رود بررسی شد.

نتایج و بحث

نتایج بررسی همه مدل‌ها در این پژوهش نشان داد که آب‌دهی یک (Q-1)، دو (Q-2) و سه (Q-3) روز گذشته و بارش یک روز گذشته (P-1)، بیش‌ترین همبستگی را با آب‌دهی روزانه رود نشان داد. به‌طور کلی، برای مدل کردن آب‌دهی رود در آبخیز کشکان دقت همه مدل‌ها قابل قبول بود. بر اساس نتایج به‌دست آمده، بیشترین دقت برای پیش‌بینی آب‌دهی روزانه جریان مربوط به مدل ANN-WOA با بیش‌ترین اندازه ضریب تبیین ($R^2 = 0/896$) و ضریب نش-ساتکلیف ($NE = 0/803$) و کمترین اندازه خطا ($RMSE = 0/0186$)، بود. پس از آن، مدل SVM با ساختار تابع کرنل پایه شعاعی و اندازه‌های $C=4$ ، $\gamma=1$ و $\epsilon=0/001$ با اندازه ضریب تبیین ($R^2 = 0/895$)، ضریب نش-ساتکلیف ($0/801$) و اندازه خطا ($NE = 0/0187$)، عملکرد بهتری نشان داد و مدل‌های ANN-PSO و ANN نیز به‌ترتیب در رده‌های سوم و چهارم بودند. نتایج بیانگر آن بود که استفاده از دستورالعمل‌های بهینه‌سازی فراابتکاری دقت مدل ANN را افزایش داد و می‌توان از آن برای آموزش شبکه استفاده کرد. بررسی ساختارهای گوناگون ANFIS نشان داد برای مدل‌سازی آب‌دهی رود منطقه مطالعه‌شده عملکرد توابع مثلثی و گوسی بیشتر بود. از سوی دیگر، خطای این مدل با اندازه‌های $RMSE=0/023$ و $NE=0/076$ در مقایسه با دیگر مدل‌ها بیشتر بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد برای پیش‌بینی آب‌دهی رود دقت مدل‌های یادگیری ماشین مانند SVM، ANFIS و ANN قابل قبول بود. تنظیم سنج‌های شبکه عصبی با استفاده از دستورالعمل‌های بهینه‌سازی مانند WOA و PSO تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد این مدل داشت. سرانجام می‌توان گفت این مدل‌ها می‌توانند جایگزین مناسبی برای مدل‌های مفهومی و آب‌شناختی در حل مسائل آب‌شناختی و آب‌دهی باشند. پیشنهاد می‌شود دو مدل SVM و ANFIS با استفاده از دستورالعمل PSO و WOA آموزش داده شود و سپس نتایج با یافته‌های این پژوهش مقایسه شود.

واژگان کلیدی: آب‌دهی رود، آبخیز کشکان، بارش-رواناب، دستورالعمل ازدحام ذرات، دستورالعمل نهنگ، هوش مصنوعی

مقدمه

رشد روزافزون جمعیت و محدودیت منابع آب سطحی کشور، اهمیت مطالعه، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آبی را دوچندان کرده است. متخصصان همواره به بررسی و پیش‌بینی آب‌دهی رود به‌علت اهمیت آن برای برنامه‌ریزی طرح‌های آبی، ساماندهی رودها، سامانه هشدار سیل و به‌ویژه برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری بهینه، توجه داشته‌اند (دیتهاکیت و همکاران ۲۰۲۳). به‌منظور پیش‌بینی آب‌دهی رود با بیشترین دقت روش‌های گوناگونی پیشنهاد شده است که شامل سه گروه بزرگ روش‌های تجربی و آماری، مفهومی و فرایند-محور هستند. از آنجایی که استفاده از مدل‌های مفهومی نیازمند داده و دانش کامل از فرآیندهای مؤثر بر پدیده است، همواره با مشکلات فراوانی همراه بوده است (لطیف ۲۰۲۳). از سوی دیگر، روش‌های پیش‌بینی داده-محور به‌علت صرفه‌جویی زمان، نیاز به کمترین اطلاعات لازم و سهولت اجرا رو به گسترش هستند و پژوهش‌گران به این روش‌ها توجه دارند (اسدآبادی و همکاران ۲۰۱۴). از جمله روش‌های مبتنی بر داده که کاربرد گسترده‌ای در علوم گوناگون دارد، می‌توان به روش‌های مبتنی بر پایه هوش مصنوعی اشاره کرد. در این روش‌ها، با استفاده از هوش مصنوعی، روابط پیچیده میان متغیرها شناسایی می‌شود و سپس مدل‌سازی انجام می‌شود (نیه و همکاران ۲۰۲۳). تاکنون پژوهش‌های گوناگونی در زمینه کاربرد هوش مصنوعی برای پیش‌بینی سری‌های زمانی آب‌شناختی انجام شده است. روش شبکه عصبی (ANN)، ساختار استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) از جمله روش‌هایی هستند که در الگوبندی با در نظر گرفتن عامل‌های مؤثر و مدل‌سازی روابط میان ورودی‌های گوناگون، خروجی مناسبی دارند و می‌توان برای پیش‌بینی فرایندهای آب‌شناختی از آنها استفاده کرد. همچنین، استفاده از دستورالعمل‌های بهینه‌سازی متفاوت به‌منظور بهبود عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی مورد توجه پژوهش‌گران بوده است. پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد به‌کار بردن دستورالعمل‌های فراابتکاری برای آموزش مدل‌های

هوش مصنوعی مؤثر است و موجب افزایش کارایی و بهبود عملکرد آن‌ها در مقایسه با آموزش سنتی این مدل‌ها می‌شود. این دستورالعمل‌ها، با الهام‌گیری از طبیعت، مسائل پیچیده بهینه‌سازی را به‌شکل تصادفی اما هدفمند و با تقلید از پدیده‌های زیستی یا فیزیکی حل می‌کنند و جواب بهینه مطلق را می‌یابند. پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه استفاده از هوش مصنوعی و دستورالعمل‌های فراابتکاری در بحث‌های آب‌شناختی انجام شده است.

غفاری و وفاخواه (۲۰۱۳) رواناب آبخیز حاجی‌قوشان را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و شبکه فازی عصبی تطبیقی مدل‌سازی کردند و دریافتند که در فرایند پیش‌بینی بارش-رواناب دقت مدل ANFIS ($MAE=2/18$, $RMSE=7/11$ و $R^2=0/6$) در مقایسه با مدل ANN ($MAE=1/97$, $RMSE=6/03$) و $R^2=0/39$ بیشتر بود. جودی و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از مدل‌های آب‌شناختی SWAT و SVM، رواناب ماهانه رود ليقوان‌چای را مدل‌سازی کردند و نتیجه گرفتند که دقت مدل SWAT ($RMSE=0/41$) در مقایسه با مدل SVM بیشتر بود. عبداله‌پور و ستاری (۲۰۱۵) در استان آذربایجان شرقی آب‌دهی روزانه رود اهرچای را با استفاده از مدل‌های ANN و ANFIS پیش‌بینی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که دقت مدل ساختار استنتاج فازی عصبی تطبیقی ($RMSE=0/318$, $R^2=0/94$) در مقایسه با شبکه‌های عصبی مصنوعی بیشتر بود. در پژوهشی ناظری‌تهرودی و همکاران (۲۰۱۶) با به‌کارگیری مدل ANFIS در شبیه‌سازی آب‌دهی رود نازلوچای، دریافتند که خطای مدل در مقایسه با دو مدل برنامه‌نویسی ژنتیک (GP) و SVM به ترتیب ۲۳ و ۳٪ کاهش یافت. صمدی و فتح‌آبادی (۲۰۱۸) با استفاده از داده‌های ایستگاه قزاقلی واقع بر رود گرگان‌رود، اندازه آب‌دهی ورودی به سد گرگان با استفاده از دو مدل ANN و SVM پیش‌بینی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد مدل SVM ($RMSE=5/31$) در مقایسه با مدل ANN ($RMSE=9/88$) برتر بود. امامی و

بارش) و آب‌شناختی (مانند آب‌دهی رود) استفاده می‌شود و داده‌های آب‌شناختی در مکان‌ها و زمان‌های گوناگون بسیار متفاوت هستند، بنابراین نمی‌توان این نتایج در یک آبخیز را برای تمام آبخیزها تعمیم داد. کشکان شاخه اصلی آبخیز کشکان است و از نظر تأمین منابع آبی در استان لرستان بسیار حائز اهمیت است. بنابراین، ارزیابی دقیق آن به منظور مدیریت بهتر منابع آبی لازم و ضروری است. از این رو، در این پژوهش افزون بر ارزیابی عملکرد مدل‌های ساختار استنتاج فازی (ANFIS) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای پیش‌بینی آب‌دهی رود در ایستگاه پل دختر (در خروجی آبخیز کشکان)، عملکرد مدل شبکه عصبی (ANN) همراه با دستورالعمل‌های بهینه‌سازی شامل دستورالعمل ازدحام ذرات (PSO)، و مدل دستورالعمل نهنگ (WOA) بررسی شدند. به این ترتیب ارزیابی دقیقی از عملکرد مدل‌های گوناگون هوش مصنوعی و دستورالعمل‌های بهینه‌سازی انجام شد. سرانجام مدل بهینه بر اساس معیارهای $RMSE$ ، R^2 و NE تعیین شد. هدف این پژوهش، تعیین سنجه‌های ورودی بهینه و بررسی عملکرد روش‌های گوناگون محاسبه‌ای نرم و استفاده از دستورالعمل‌های فراابتکاری بهینه‌سازی در پیش‌بینی آب‌دهی رود در آبخیز کشکان بود.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعه شده

آبخیز کشکان در استان لرستان از زیرمجموعه‌های آبخیز بزرگ کرخه با مساحت کل ۹۵۲۴/۱ کیلومتر مربع، ۱۸/۵٪ از مساحت آبخیز بزرگ کرخه را شامل می‌شود (گزارش منابع آب‌های سطحی وزارت نیرو ۲۰۰۷). که میان مختصات جغرافیایی طول شرقی ۱۱' ۳۴° تا ۱' ۴۹° و طول شمالی ۵' ۳۳° تا ۵۶' ۳۴° است. از پیوستن هررود و آب‌الشر که از بلندی‌های کرین در غرب و جنوب‌غربی بروجرد سرچشمه می‌گیرند رود کشکان تشکیل می‌شود و سپس شاخه‌های فرعی و نسبتاً پر آب دیگری به آن اضافه می‌شود. این رود حدود ۶۰ کیلومتر در جهت غرب به مسیر خود ادامه می‌دهد و پس از ۴۵ کیلومتر به رود

همکاران (۲۰۱۹)، به منظور پیش‌بینی بار رسوب معلق رود زرینه‌رود از سه دستورالعمل فراابتکاری بهینه‌سازی شامل دستورالعمل ژنتیک، دستورالعمل گرگ خاکستری و دستورالعمل انتخابات استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد خطای دستورالعمل گرگ خاکستری ($NE=0/74$ ، $RMSE=0/022$ و $R^2=0/96$)، در مقایسه با دیگر دستورالعمل‌ها کمتر بود. پریسوج و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از مدل‌های SVM، ANN و ماشین پیشینه یادگیری (ELM) آب‌دهی روزانه و ماهانه رود چهار رود ایالت آمریکا را مدل‌سازی کردند. نتایج نشان‌دهنده دقت بیش‌تر مدل شبکه عصبی و مدل بردار پشتیبان در مقایسه با مدل ELM بود. در هند سامانتاری و ساهو (۲۰۲۳) به منظور توسعه مدل SVM، با استفاده از دستورالعمل‌های بهینه‌سازی نهنگ و ازدحام ذرات، غلظت رسوب رود ماهانادی را پیش‌بینی کردند و نتایج به‌دست آمده را با مدل SVM مقایسه کردند. بررسی نتایج نشان داد، دقت مدل SVM-WOA ($MSE=0/375$)، برای ایستگاه‌های Sundargarh و Salebhata در مقایسه با اندازه‌های مدل SVM-PSO ($MSE=1/005$ ، $MSE=1/014$) بیشتر بود. حکیمی و همکاران (۲۰۲۴)، برای پیش‌بینی آب‌دهی ورودی روزانه سد آبگیر سفیدرود، از ترکیب دستورالعمل‌های فراابتکاری شامل دستورالعمل‌های چرخه آب (WCA)، گرگ خاکستری (GOA)، نهنگ (WOA)، دستورالعمل شبکه عصبی (NNA)، و ملخ (GOA) برای آموزش ساختار عصبی-فازی و به‌روزرسانی سنجه‌های آن استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد مدل ترکیبی ANFIS-WCA با کمترین اندازه‌های $MAE=0/0736$ ، $SI=0/5048$ و $NRMSE=0/0736$ بیشترین اندازه $R^2=0/984$ در مقایسه با دیگر مدل‌ها برتر بود.

نتایج پژوهش‌ها بیانگر آن است که عملکرد روش‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی فرایندهای آب‌شناختی خوب است. اما با توجه به اینکه عملکرد این مدل‌ها، متأثر از داده‌های ورودی است و با توجه به این مهم که در مباحث آب‌شناختی، از داده‌های هواشناسی (مانند

ایستگاه مطالعه‌شده پل‌دختر نام دارد که در انتهای‌ترین نقطهٔ آبخیز کشکان (نقطه تمرکز) است (شکل ۱). از این رو، دلیل بررسی جریان این ایستگاه در مهار و مدیریت جریان به‌ویژه در شرایط سیلابی حائز اهمیت است. مشخصات آبخیز پل‌دختر و ایستگاه پل‌دختر در جدول ۱ آورده شده است.

خرم‌آباد که عموماً جهت جریان آن از شرق به غرب است، می‌پیوندد و در جهت جنوب‌غربی ادامه می‌یابد. پس از ادغام شاخه‌های فرعی چلهول و مادیان‌رود با آن، سرانجام به سیمره پیوسته و رود کرخه را پدید می‌آورد. از میان رودهای استان لرستان، رود کشکان از سال ۱۳۳۴ تاکنون با ۱۷ سیلاب (بیش از ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه) سیل‌خیزترین رود این استان به‌شمار می‌آید.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخیز کشکان در آبخیز بزرگ کرخه و ایستگاه پل‌دختر.

Figure 1- Geographical location of the Kashkan Watershed in the large Karkheh basin and Pol Dokhtar Station.

جدول ۱- مشخصات آبخیز پل‌دختر و ایستگاه آب‌سنجی پل‌دختر.

Table 1- Characteristics of the Pol Dokhtar Watershed and station.

Area (km ²)	slope (degree)	Geographical location		Q(m ³ /s)			P(mm)		
		longitude	latitude	min	mean	max	min	mean	max
202.38	23.1	47-43-03	33-09-42	0.011	47.8	1546	0	1.06	115

خاک و (...), پستی‌بلندی آبخیز (شیب آبخیز، مساحت، و ...) کاربری زمین، پوشش گیاهی و ... به شکل مستقیم و غیرمستقیم بر این پدیده تأثیرگذارند. در این پژوهش، با توجه به محدودیت دسترسی به همه داده‌های مؤثر، برای پیش‌بینی جریان یک روز بعد، از داده‌های بارش

روش پژوهش
عامل‌های محیطی گوناگونی بر اندازهٔ آب‌دهی رود در یک آبخیز تأثیرگذار هستند. داده‌های هواشناسی (دمای هوا، رطوبت خاک، تبخیر، تعرق، بارش و ...)، مشخصات زمین‌شناسی (نوع خاک، اندازهٔ نفوذپذیری

سنجه‌های بخش مقدم با استفاده از روش گرادیان کاهشی محاسبه می‌شوند (سامانتاری و ساهو ۲۰۲۲). درباره روش حل ترکیبی اطلاعات کامل‌تر و جامع‌تر در پژوهش‌های جانگ (۱۹۹۳) و مارس (۲۰۰۴) ارائه شده است. برای سادگی کار اگر، فرض شود ساختار فازی دو ورودی x و y دارد و خروجی آن z است، قوانین به شکل زیر تعریف می‌شوند (جانگ ۱۹۹۳).

قانون (۱)
$$\text{if } (x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1) \\ \text{then } (f_1 = p_1x + q_1y + r_1)$$

قانون (۲)
$$\text{if } (x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_2) \\ \text{then } (f_2 = p_2x + q_2y + r_2)$$

وایازی بردار پشتیبان (SVR)

ماشین‌های بردار پشتیبان یک ساختار یادگیری است که بر مبنای نظریه بهینه‌سازی مقید عمل می‌کند. در این نظریه از اصل استقرای کمینه‌سازی خطای ساختاری استفاده می‌شود و سرانجام یک جواب بهینه کلی پیشنهاد می‌شود (شاهی‌نژاد و دهقانی ۲۰۱۷). به‌طور کلی ماشین‌های بردار پشتیبان به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول که طبقه‌بندی‌کننده نام دارند داده‌ها را دسته‌بندی می‌کند و هدف آن تشخیص طبقه داده جدید است. دسته دوم که عمل وایازی و برازش تابع را انجام می‌دهد، وایازی بردار پشتیبان نامیده می‌شود که هدف آن پیش‌بینی داده است. ماشین‌های بردار پشتیبان با استفاده از فرضیه جداپذیر بودن طبقه‌ها از هم به شکل خطی، ابر صفحاتی را به دست می‌آورد که می‌تواند طبقه‌ها را از هم جدا کند. زمانی که جدا کردن خطی داده‌ها امکان‌پذیر نباشد، ماشین بردار پشتیبان با اعمال توابع (کرنل) داده‌ها را به فضای با ابعاد بیشتر نگاشت می‌دهد تا بتوان آن‌ها را در این فضای جدید به شکل خطی جدا کرد (چوبین و همکاران ۲۰۱۹).

در این مدل، سه سنجه C, γ, ϵ باید بهینه شوند. سنجه γ ممکن است منجر به بیش‌برازش یا کم‌برازش کمتر شود. در شرایطی که مدل نتواند برای داده‌های آزمایش پیش‌بینی دقیقی انجام دهد، برازش کمتر رخ می‌دهد که در این حالت، مدل داده‌های آموزش را به خاطر می‌سپارد و در داده‌های غیر از آموزش دچار خطا

(P) و آبدهی رود (Q) در مقیاس روزانه در بازه زمانی ۴۷ ساله (۱۳۹۷-۱۳۵۰) استفاده شد. این داده‌ها از سازمان‌های مربوطه تهیه شد. با توجه به کامل نبودن داده‌ها در بازه زمانی مطالعه‌شده، ابتدا پیش پردازش داده‌ها انجام شد. از این‌رو، پس از مرتب‌سازی داده‌ها، در شرایط نبودن گزارش داده رسوب یا آبدهی رود و یا وجود داده‌های پرت، ردیف مربوطه حذف شد. در گام بعد، با توجه به اثرپذیری جریان رود از سری زمانی اطلاعات نامبرده، اندازه مؤثر بودن تأخیر زمانی سنجه‌های P و Q مشخص شد و سرانجام به‌عنوان ورودی به مدل تعریف شدند. برای مرحله آموزش ۷۰٪ داده‌ها و برای مرحله آزمایش و صحت‌سنجی ۳۰٪ داده‌ها در نظر گرفته شدند.

شبکه عصبی فازی-استنتاجی تطبیقی (ANFIS)

ساختارهای عصبی-فازی استنتاجی به دست آمده ترکیب ساختارهای فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی هستند و از مزایای هر دو ساختار استفاده می‌کند (اسکندری و همکاران ۲۰۱۹). در این ساختار، سنجه‌های ساختار فازی با استفاده از دستورالعمل‌های آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی به دست می‌آیند. ساختار استنتاج فازی با استفاده از تعدادی قوانین اگر (بخش مقدم) و آنگاه (بخش تالی) یک رابطه جز به جز غیرخطی را از فضای ورودی به فضای خروجی ارائه می‌دهد (عبدالله‌پور و همکاران ۲۰۱۵). روش آموزش در ANFIS، روش پس انتشار خطا است. در مقایسه با ANN، مدل ANFIS برای تعیین الگوی موجود میان داده‌ها از یک دستورالعمل ترکیبی استفاده می‌کند. به این شکل که برای بهینه‌سازی سنجه‌های مدل، ترکیب روش‌های گرادیان کاهشی و حداقل مربعات را به کار می‌گیرد. هر تکرار در این مدل شامل دو فاز پیش‌رو و پس‌رو می‌باشد. در فاز پیش‌رو سنجه‌های بخش مقدم ثابت است و سنجه‌های بخش تالی با استفاده از روش حداقل مربعات تعیین می‌شوند. در فاز پس‌رو، سنجه‌های بخش تالی ثابت است و سنجه‌های بخش تالی با استفاده از روش حداقل مربعات تعیین می‌شوند. در فاز پس‌رو، سنجه‌های بخش تالی ثابت است و

پیرامون طعمه خود و حرکات مارپیچ، روی سطح دریا شکار می‌کنند. روند جستجوی دستوالعمل نهنگ شامل سه مرحله محاصره طعمه، مرحله بهره‌برداری (حمله به حباب تور) و مرحله اکتشاف (جستجو برای طعمه) است. در مرحله محاصره طعمه، از آنجایی که مکان شکار بهینه در فضای جستجو از گذشته مشخص نیست، دستوالعمل فرض می‌کند که بهترین راه حل کاندید حال حاضر، شکار هدف و یا نزدیک به حالت مطلوب است. بعد از اینکه بهترین عامل جستجو شناسایی شد، عامل‌های دیگر جستجو تلاش می‌کنند تا مکان خود را نسبت به بهترین عامل جستجو، به‌روزرسانی کنند. این رفتار نهنگ‌ها با استفاده از معادله‌های ۳ و ۴ تعریف شده است (معماری و همکاران ۲۰۲۲).

$$\vec{D} = |\vec{C} \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (3)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (4)$$

t: شمارنده تکرار، A و C: بردارهای ضریب‌ها، X^* : بردار مکان بهترین راه حل به دست آمده در حال حاضر و X: بردار مکان است. باید توجه داشت که در شرایط وجود راه حل بهتر، X^* در هر تکرار باید به‌روز شود. بردار A و C با استفاده از معادله‌های ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند (معماری و همکاران ۲۰۲۲).

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (5)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (6)$$

a: به شکل خطی از اندازه ۲ به سمت اندازه صفر در تکرارها (در هر دو فاز اکتشاف و استخراج) کاهش می‌یابد و r بردار تصادفی در بازه ۰ تا ۱ است. در مرحله بهره‌برداری (حمله به حباب تور)، برای مدل‌سازی ریاضی رفتار حباب تور نهنگ‌های گوژپشت (حرکت انقباضی و مارپیچی)، دو روش طراحی شده است. روش انقباضی که در آن محدوده نوسان A به وسیله a کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، A اندازه تصادفی در فاصله a تا -a است و a در تکرارها، از اندازه ۲ تا ۰ کاهش می‌یابد. با انتخاب اندازه‌های تصادفی A در فاصله ۱ تا -۱، می‌توان مکان جدید عامل جستجو را میان مکان اصلی عامل و مکان بهترین عامل کنونی، تعریف کرد. در مرحله حرکت مارپیچی، ابتدا فاصله میان نهنگ

می‌شود. سنجه C یک مهارکننده اندازه خطای پیش‌بینی است و اندازه بهینه E به نوع نويز موجود در داده‌ها بستگی دارد (یو و همکاران ۲۰۰۴، نورانی و علیزاده ۲۰۱۵). مراحل حل مسئله در دستوالعمل ماشین بردار پشتیبان همانند دیگر مدل‌های یادگیری ماشین به دو مرحله آموزش و آزمایش تقسیم‌بندی می‌شود.

شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه (ANN-MLP) یکی از معروف‌ترین شبکه‌های عصبی که در این پژوهش استفاده شد، شبکه عصبی MLP است. این شبکه از لایه‌های گوناگون شامل لایه ورودی، لایه پنهان و لایه خروجی تشکیل شده است (اسکندری و همکاران ۲۰۱۹). هر لایه تعدادی نورون دارد که وظایف خاصی دارند. در لایه ورودی، به تعداد سنجه‌های ورودی به مدل، نورون وجود دارد و هر کدام معرف یک سنجه تأثیرگذار بر خروجی است. عملیات پردازش داده‌ها در لایه پنهان انجام می‌شود و لایه خروجی شامل اندازه‌های پیش‌بینی شده به وسیله مدل است. مدل MLP از الگوی پس انتشار (BP) برای آموزش شبکه استفاده می‌کند. داده‌ها به وسیله لایه ورودی به مدل تعریف شده‌اند و پس از عبور از لایه پنهان و لایه خروجی، با مقایسه اندازه‌های پیش‌بینی شده به وسیله مدل با اندازه‌های واقعی، اندازه خطای مدل محاسبه می‌شود. این خطا به شکل پس انتشار در شبکه بازگشت داده می‌شود و سنجه‌های موجود میان نورون‌ها (شامل وزن‌ها و بایاس‌ها) که مهم‌ترین سنجه در فرایند آموزش شبکه هستند، دوباره تنظیم می‌شوند (فلامکی و همکاران ۲۰۱۳).

دستوالعمل بهینه‌سازی نهنگ

دستوالعمل فراابتکاری نهنگ اولین بار به وسیله میرجلیلی و همکاران ارائه شد (میرجلیلی و لویز ۲۰۱۶). این دستوالعمل یکی از دستوالعمل‌های بهینه‌سازی الهام‌گرفته شده از طبیعت و مبتنی بر جمعیت است که در آن از روش شکار نهنگ‌های گوژپشت یا کوهان‌دار به نام روش تغذیه شبکه حبابی استفاده شده است. نهنگ‌ها با ایجاد حباب‌هایی در

تعامل میان افراد یک گروه نیز بستگی دارد (شاه حسینی و همکاران ۲۰۱۱، محمدی و مؤذنزاده ۲۰۱۹). هر ذره با توجه به تجربه و دانش خود و همچنین دانش ذرات دیگر که در همسایگی آن است، کم کم به سمت جواب بهینه حرکت می‌کند. همکاری و حافظه مشترک میان ذرات در این دستورالعمل موجب می‌شود شانس بیشتری برای یافتن راه حل بهینه وجود داشته باشد و سریع‌تر راه حل‌ها با کیفیت مطلوب کشف می‌شوند (وانگ ۲۰۱۸). روش کار دستورالعمل ازدحام ذرات شامل سه مرحله تولید موقعیت و سرعت ذرات، به‌روزرسانی سرعت ذرات و به‌روزرسانی موقعیت ذرات است. به این شکل که ذرات با موقعیت‌ها و سرعت‌های اولیه به شکل تصادفی تولید می‌شوند و سپس ذرات در هر تکرار، بر اساس بهترین موقعیت خود و همسایگانش در گذشته، سرعت و موقعیت خود را به‌روزرسانی می‌کند و به هدف نزدیک‌تری می‌رسد. سرانجام پس از تکرارهای متوالی، به جواب بهینه همگرا می‌شود. با استفاده از رابطه‌های ریاضی ۹ و ۱۰ حرکت ذرات در این دستورالعمل تعیین می‌شود (وانگ و همکاران ۲۰۱۸).

$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + C_1 \times \text{rand}_1(pbest_i(t) - x_i(t)) + C_2 \times \text{rand}_2(gbest_i(t) - x_i(t)) \quad (9)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + V_i(t+1) \quad (10)$$

بهنجارسازی داده‌ها

وارد کردن داده‌ها به شکل خام بر اندازه سرعت و دقت شبکه مؤثر بوده و موجب کاهش آن‌ها می‌شود. بهینه‌سازی داده‌ها روشی است که برای جلوگیری از بروز چنین شرایطی انجام می‌گیرد. این عمل به‌خصوص زمانی که دامنه تغییرات ورودی‌ها گسترده باشد، کمک قابل توجهی به آموزش بهتر و سریع‌تر مدل می‌کند. بنابراین در این پژوهش داده‌های ورودی با استفاده از رابطه ۱۱ در محدوده ۰ و ۱ بهینه شدند (بویوکیدیز و کامسو ۲۰۱۷).

$$X_{norm} = \frac{X_0 - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (11)$$

قرارگرفته در مختصات فعلی (X, Y) و بهترین عامل جستجو (X^*, Y^*) با استفاده از رابطه ۷ محاسبه می‌شود (D') و سپس با استفاده از رابطه ۸ حرکت نهنگ‌ها به شکل مارپیچی شبیه‌سازی می‌شود (معماری و همکاران ۲۰۲۲).

$$\vec{D}' = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (7)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (8)$$

b : ثابتی برای تعریف شکل مارپیچ لگاریتمی و l عددی تصادفی میان ۱ تا ۱- است.

دستورالعمل بهینه‌سازی ازدحام ذرات

دستورالعمل فراابتکاری ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی مسائل پیچیده و توابع پیوسته غیرخطی استفاده می‌شود. این دستورالعمل، از رفتار دسته جمعی پرندگان و ماهی‌ها در هنگام جستجوی غذا الهام می‌گیرد که در آن هر راه حل (در این پژوهش، وزن‌ها و بایاس‌های شبکه عصبی) که یک ذره نامیده می‌شود، معادل با یک پرند در حرکت دسته جمعی پرندگان فرض شده است و شایستگی آن به وسیله یک تابع هدف مشخص می‌شود. اساس دستورالعمل PSO نه تنها به رفتار فرد در اجتماع وابسته است، بلکه به چگونگی

p_{best} : بهترین موقعیتی که ذره تجربه تاکنون داشته است و g_{best} : بهترین موقعیتی است که به وسیله کل ذرات تشخیص داده شده است. T : نشان دهنده تعداد تکرار، $rand_1$ و $rand_2$: اعداد تصادفی در بازه ۱ و صفر، c : ثابت شتاب و ω : ضریب اینرسی (بازه صفر و ۱) است. ضریب c_1 : سنجه شناختی (تک ذره)، ضریب c_2 : سنجه اجتماعی (همه ذرات) است که نشان دهنده شیب حرکت در جستجوی محلی است. اندازه این ضریب‌ها میان صفر و ۲ است. در این پژوهش تعداد ذرات اولیه ۸ و تعداد تکرار ۱۰۰ در نظر گرفته شد.

به‌کارگرفته شد. این دو روش برای انتخاب ورودی‌ها در پژوهش‌های آب‌شناختی بسیار کاربرد دارند و هدف اصلی آن‌ها توسعه مدلی است که از داده‌های مؤثر ورودی با تأخیر زمانی به‌منظور پیش‌بینی زمان حال استفاده کند (مالیک و همکاران ۲۰۲۱).

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل

به‌منظور ارزیابی تأثیر سنج‌های دو مدل ANFIS و SVM در بخش آموزش و صحت‌سنجی، از شاخص‌های ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش-سانکلیف (NE) استفاده شد. در این پژوهش با استفاده از معادله‌های ۱۲ تا ۱۴ محاسبه شدند. (موریاسی ۲۰۰۷، کتیپاگلو ۲۰۲۳)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2} \quad (12)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)(Q_s - \bar{Q}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2 \sum_{i=1}^n (Q_s - \bar{Q}_s)^2}} \quad (13)$$

$$NE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \right) \quad (14)$$

این منظور دو سنج بارش روزانه و آب‌دهی رود روزهای گذشته به‌عنوان سنج‌های تأثیرگذار بر آب‌دهی روزانه انتخاب شدند. سپس، برای تعیین سنج‌های ورودی مؤثر در آب‌دهی رود و تأخیر زمانی از روش‌های ACF و PACF استفاده شد (شکل ۲ الف). همچنین، از ضریب همبستگی پیرسون برای تعیین سنج‌های ورودی مؤثر در آب‌دهی رود و بارش در ایستگاه پل‌دختر استفاده شد (شکل ۲ ب). نتایج این پژوهش نشان داد اگرچه میان متغیر هدف (آب‌دهی) و آب‌دهی و بارش روزهای گذشته تا حدودی همبستگی وجود داشت، اما بیش‌ترین همبستگی در پیش‌بینی آب‌دهی روزانه مربوط به آب‌دهی یک (Q-1)، دو (Q-2) و سه (Q-3) روز گذشته و بارش یک روز گذشته (P-1) بود. در نتیجه فضای بردار ورودی به مدل‌ها برای پیش‌بینی روز

X_{norm} : اندازه بهینه‌شده، X_0 : اندازه‌های مشاهده‌ای، X_{min} : کمترین اندازه و X_{max} : بیش‌ترین اندازه از مجموعه داده‌ها است.

انتخاب ورودی‌های مؤثر

از آنجایی که اطلاعات اساسی ساختاری که مدل‌سازی می‌شود به‌وسیله داده‌های ورودی مشخص می‌شوند و داده‌های ورودی مهم‌ترین سنج در تعیین ویژگی‌های یک ساختار هستند، از این‌رو، مسائل مهم در استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و داده مینا، انتخاب سنج‌های ورودی بهینه است. در این پژوهش روش‌های آماری تابع همبستگی خودکار (ACF) و تابع همبستگی خودکار جزئی (PACF) و ضریب همبستگی پیرسون برای تعیین ترکیب بهترین متغیرهای ورودی

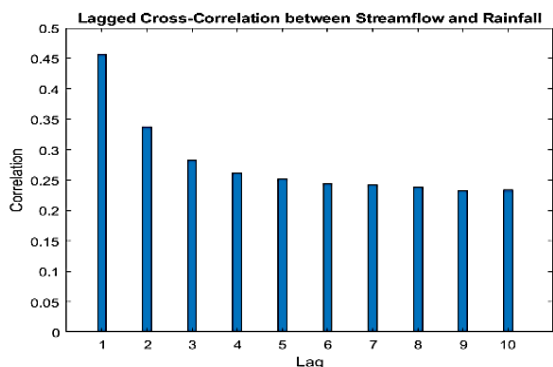
R^2 : ضریب تبیین و بیانگر ارتباط خطی میان داده‌های بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس است و بدون بعد است. Q_o : اندازه‌های مشاهده‌ای، Q_s : اندازه‌های محاسبه‌شده به‌وسیله مدل، \bar{Q}_o : اندازه میانگین داده‌های مشاهده‌ای، N : تعداد نمونه‌ها است. هر چه اندازه R^2 به عدد ۱ و اندازه RMSE به عدد صفر نزدیکتر باشد، دقت مدل بیش‌تر است.

نتایج و بحث

انتخاب ورودی‌های اولیه مناسب و تأثیرگذار در پدیده به‌منظور آموزش ماهیت سازوکار حاکم بر پدیده باعث بهبود عملکرد مدل می‌شود. از این‌رو، در الگوسازی آب‌دهی رود کشکان نیز تلاش شد تا مؤثرترین سنج‌های ورودی برای آموزش مدل انتخاب شوند. به

شد که هر کدام شامل ترکیبات گوناگونی از ورودی‌های مؤثر بودند.

بعد حداکثر ۴ متغیر داشت. بر این اساس و بر پایه جدول ۲ شش سناریوی گوناگون برای مدل‌ها تعریف

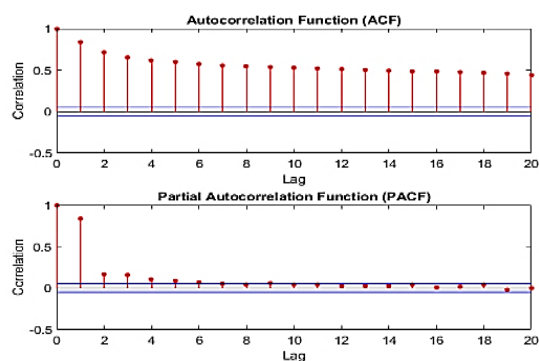


ب- استفاده از ضریب همبستگی پیرسون برای تعیین همبستگی آب‌دهی رود و بارش.

B: Using the Pearson correlation coefficient to determine the correlation between river streamflow and rainfall

شکل ۲- تعیین سنجه‌های ورودی مؤثر با استفاده از روش‌های ACF، PACF و ضریب پیرسون.

Figure 2- Determining effective input parameters using ACF, PACF and Pearson coefficient methods.



الف- استفاده از روش‌های ACF و PACF برای تعیین همبستگی آب‌دهی روزانه با آب‌دهی‌های گذشته.

A: Using ACF and PACF methods to determine the correlation of daily streamflow with past streamflows

جدول ۲- ترکیب ورودی‌های مؤثر به مدل‌ها.

Table 2-combination of effective inputs to models.

Model number	Effective input structure	Output
1	Q-1	Q
2	Q-1, Q-2	Q
3	Q-1, Q-2, Q-3	Q
4	Q-1, P-1	Q
5	Q-1, Q-2, P-1	Q
6	Q-1, Q-2, Q-3, P-1	Q

شده است. بر پایه نتایج جدول ۳، عملکرد مدل ANFIS برای پیش‌بینی جریان قابل قبول بود. همچنین، مشخص شد در سناریوی ۱، مدل با چهار تابع عضویت مثلثی $RMSE=0.025$ و $R^2=0.88$ در مرحله آموزش و $RMSE=0.0208$ و $R^2=0.88$ در مرحله صحت‌سنجی، کمترین اندازه خطا را در پیش‌بینی آب‌دهی رود داشت. بررسی دیگر ترکیبات ورودی و ساختارهای گوناگون ANFIS نشان داد توابع مثلثی و گوسی عملکرد بیشتری در مدل‌سازی آب‌دهی رود منطقه مطالعه شده داشتند. عبدالله پور و ستاری (۲۰۱۵) دریافتند که استفاده از توابع مثلثی و گوسی باعث بهبود

نتایج مدل ساختار استنتاج فازی-عصبی تطبیقی

پس از پیش‌پردازش و آماده‌سازی داده‌ها، شش سناریوی تعریف‌شده، با مدل ANFIS مدل‌سازی شدند. به منظور یافتن مدل بهینه در هر سناریو، سنجه‌های مدل شامل نوع و تعداد توابع عضویت بررسی شد. در این پژوهش از سه تابع عضویت مثلثی (trimf)، دوزنقه‌ای (trapm) و گوسی (gaussmf) استفاده شد. با اجرای پرتکرار مدل و بر پایه معیارهای ارزیابی، مدلی که بیشترین دقت را داشت به‌عنوان بهترین مدل پیش‌بینی آب‌دهی رود یک روز بعد در ایستگاه پلدختر پیشنهاد شد. نتایج اجرای سناریوهای گوناگون در دو مرحله آموزش و صحت‌سنجی در جدول ۳ نشان‌داده

یک، دو و سه روز تأخیر همراه با بارش یک روز گذشته بود، در پیش‌بینی آب‌دهی رود بیش‌ترین دقت را داشت.

دقت مدل ANFIS شد که با یافته‌های این پژوهش هم‌راستا است. سناریوی ۶ ($RMSE=0.0203$ و $R^2=0.882$) که ترکیبی از آب‌دهی رود با

جدول ۳- نتایج مدل ANFIS در پیش‌بینی آب‌دهی روزانه رود.

Table 3- Results of ANFIS model in predicting daily flow.

models	Inputs combination	Number and type of membership function	RMSE		R ²		NE	
			Training	Validation	Training	Validation	Training	Validation
1	Q (t-1)	4, trimf	0.0250	0.0208	0.839	0.882	0.687	0.750
		4, trapmf	0.0251	0.0208	0.840	0.879	0.682	0.754
		3, gaussmf	0.0250	0.0218	0.838	0.872	0.684	0.730
2	Q (t-1), Q (t-2)	4, trimf	0.0251	0.0207	0.834	0.880	0.680	0.756
		2, trapmf	0.0251	0.0219	0.837	0.866	0.683	0.727
		3, gaussmf	0.0253	0.0218	0.834	0.870	0.677	0.728
3	Q (t-1), Q (t-2), Q (t-3)	3, trimf	0.0254	0.0216	0.828	0.866	0.675	0.735
		4, trapmf	0.0270	0.0228	0.803	0.848	0.632	0.705
		2, gaussmf	0.0254	0.0218	0.833	0.864	0.673	0.730
4	Q (t-1), R(t-1)	3, trimf	0.0252	0.0203	0.836	0.885	0.678	0.768
		3, trapmf	0.0260	0.0211	0.825	0.883	0.658	0.747
		3, gaussmf	0.0250	0.0212	0.839	0.880	0.684	0.744
5	Q (t-1), Q (t-2), R(t-1)	3, trimf	0.0256	0.0207	0.826	0.880	0.670	0.756
		3, trapmf	0.0277	0.0233	0.808	0.868	0.613	0.717
		4, gaussmf	0.0252	0.0206	0.831	0.881	0.679	0.758
6	Q (t-1), Q (t-2), Q (t-3), R(t-1)	3, trimf	0.0264	0.0220	0.810	0.857	0.648	0.725
		3, trapmf	0.0280	0.0240	0.790	0.834	0.605	0.673
		5, gaussmf	0.0250	0.0203	0.835	0.882	0.682	0.761

نتایج مدل ماشین بردار پشتیبان

سناریوهای گوناگون در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به شاخص‌های آماری به‌دست آمده، مشخص شد در تمام شرایط اندازه ϵ برابر با 0.01 مطلوب بود و با اندازه γ کمتر از ۱، دقت مدل بیش‌تر بود. بر پایه نتایج جدول ۴، ساختار ترکیبی شماره ۶ با تابع کرنل پایه شعاعی $C=4$ و $\gamma=1$ ، $\epsilon=0.01$ کمترین اندازه خطا را در دو مرحله آموزش $RMSE=0.0223$ و صحت‌سنجی $RMSE=0.0187$ داشت و بیش‌ترین اندازه همبستگی را در پیش‌بینی آب‌دهی جریان نشان داد.

در این مرحله نیز مانند مدل ANFIS، داده‌ها پس از آماده‌سازی به مدل SVM تعریف شدند. برای تعیین مدل بهینه، در هر سناریو اندازه‌های گوناگونی برای سه سنجه C, γ, ϵ در نظر گرفته شد. با اعمال اندازه‌های ۱ تا ۲۰ برای مشخصه C ، 0.01 تا 0.1 با گام 0.1 برای ϵ و 0.1 تا 2 با گام 0.1 برای γ تلاش شد، برای عملکرد این سه سنجه بررسی جامعی انجام شد. سرانجام بر اساس اندازه‌های R^2 و $RMSE$ داده‌های پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل و اندازه‌های مشاهده‌ای، مدل بهینه انتخاب شد. نتایج به‌دست آمده از مدل SVM برای

جدول ۴- نتایج مدل SVM در پیش‌بینی آب‌دهی روزانه رود.

Table 4 - The results of the SVM model in predicting the daily flow rate.

model	Inputs combination	C, ϵ, γ parameters	RMSE		R ²		NE	
			Training	Validation	Training	Validation	Training	Validation
1	Q (t-1)	5,0.001,0.5	0.0240	0.0203	0.844	0.874	0.706	0.765
2	Q (t-1), Q (t-2)	15,0.001,0.8	0.0239	0.0200	0.846	0.878	0.711	0.771
3	Q (t-1), Q (t-2), Q (t-3)	15,0.001,0.8	0.0238	0.0195	0.848	0.885	0.714	0.782
4	Q (t-1), R(t-1)	1,0.001,0.6	0.0233	0.0202	0.854	0.876	0.725	0.766
5	Q (t-1), Q (t-2), R(t-1)	3,0.001,0.4	0.0223	0.0194	0.867	0.887	0.750	0.786
6	Q (t-1), Q (t-2), Q (t-3), R(t-1)	4,0.001,1	0.0223	0.0187	0.865	0.895	0.737	0.801

مبتنی بر گرادیان است که با محاسبه و اعمال به‌روزرسانی‌های وزن بر اساس گرادیان تابع خطا، وزن‌های ANN را به‌طور پرتکرار تنظیم می‌کند. در این پژوهش نتایج مربوط به مدل شبکه عصبی نشان داد همانند مدل‌های SVM و ANFIS، سناریوی ۶ ($R^2=0/199$ و $NE=0/793$, $RMSE=0/888$) بیش‌تری در مقایسه با دیگر ترکیبات ورودی داشت. شناسایی مناسب‌ترین دستورالعمل بهینه‌سازی می‌تواند منجر به بهبود نرخ همگرایی، تعمیم بهتر و پیش‌بینی دقیق‌تر شبکه‌های عصبی مصنوعی شود. در این پژوهش به‌منظور بررسی عملکرد دستورالعمل‌های بهینه‌سازی گوناگون در مقایسه با دستورالعمل LM دو دستورالعمل WOA و PSO در نظر گرفته شد. این دو دستورالعمل مبتنی بر جمعیت بود که تعداد جمعیت اولیه در آن‌ها ۸ و تعداد تکرار ۱۰۰ در نظر گرفته شد. نتایج مربوط به هر دو مدل ترکیبی در جدول ۵ آورده شده است. مقایسه نتایج نشان داد که استفاده از این دو دستورالعمل بهینه‌سازی باعث افزایش دقت مدل شبکه عصبی در پیش‌بینی آب‌دهی رود شد. به‌گونه‌ای که مدل ANN-WOA $RMSE=0/186$ و $R^2=0/896$ در مرحله صحت‌سنجی، کمترین اندازه خطا را در پیش‌بینی آب‌دهی رود داشت.

نتایج مدل‌های شبکه عصبی و دستورالعمل‌های بهینه‌سازی در مدل شبکه عصبی مصنوعی، تعداد لایه‌های پنهان، نورون‌های موجود در هر لایه و نوع تابع فعال‌ساز نقش مهمی در کارایی مدل‌ها دارند. با انتخاب مناسب این سنج‌ها می‌توان بهبود قابل توجهی در دقت و کارایی مدل‌های شبکه عصبی ایجاد کرد. یکی از روش‌های متداول برای آموزش شبکه‌های عصبی، استفاده از روش سعی و خطا است. در این روش، سنج‌های شبکه مانند وزن‌ها و بایاس‌ها با تکرار و به‌شکل تجربی بهینه می‌شوند. به این ترتیب که ابتدا سنج‌های اولیه انتخاب می‌شود و سپس مدل آموزش داده می‌شود و عملکرد آن روی داده‌های اعتبارسنجی ارزیابی می‌شود. سپس بر اساس نتایج، سنج‌ها تنظیم می‌شود و دوباره فرآیند آموزش و ارزیابی تکرار می‌شود. در مدل ترکیبی، این فرآیند معمولاً با استفاده از دستورالعمل‌های بهینه‌سازی انجام می‌شود، که به شبکه عصبی کمک می‌کند تا با دقت بیش‌تری به داده‌های آموزشی تطبیق یابد و عملکرد بهتری داشته باشد. از معروف‌ترین دستورالعمل‌های بهینه‌سازی که شبکه عصبی برای حل مسئله از آن استفاده می‌کند، دستورالعمل لوببرگ مارکوارت (LM) است که در این پژوهش نیز برای مدل ANN در نظر گرفته شده است. این دستورالعمل بهینه‌سازی

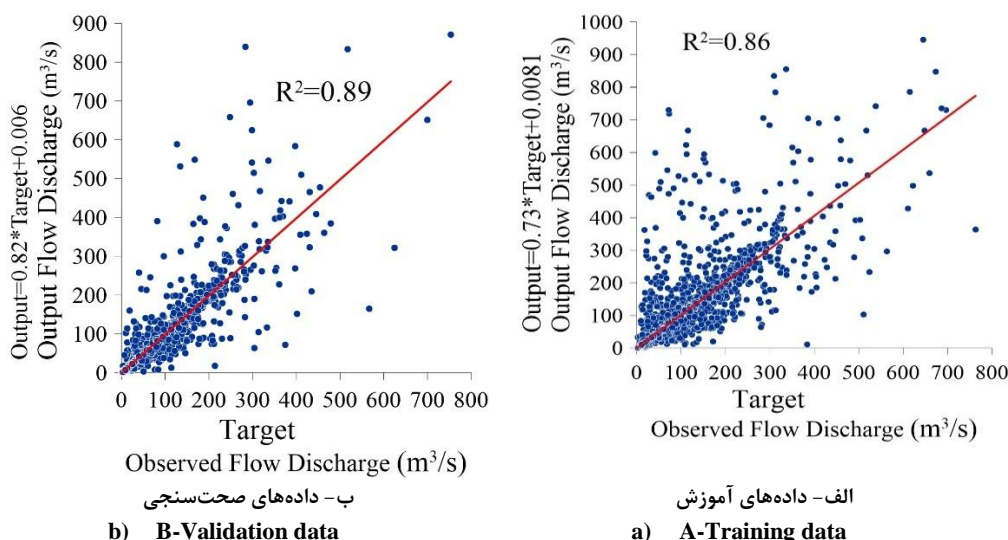
جدول ۵- نتایج مدل ANN، ANN-PSO و ANN-WOA در پیش‌بینی آب‌دهی روزانه رود.

Table 5 - The results of the SVM model in predicting the daily flow rate.

models	Inputs combination	RMSE		R2		NE	
		Training	Validation	Training	Validation	Training	Validation
ANN	Q (t-1)	0.0244	0.022	0.837	0.855	0.700	0.720
	Q (t-1), Q (t-2)	0.0239	0.0200	0.843	0.879	0.711	0.771
	Q (t-1), Q (t-2), Q (t-3)	0.0234	0.0210	0.850	0.867	0.723	0.749
	Q (t-1), R(t-1)	0.0221	0.0253	0.868	0.827	0.754	0.637
	Q (t-1), Q (t-2), R(t-1)	0.0235	0.0204	0.850	0.876	0.722	0.764
	Q (t-1), Q (t-2), Q (t-3), R(t-1)	0.0228	0.0199	0.895	0.888	0.730	0.793
ANN-PSO	Q (t-1)	0.0239	0.0204	0.844	0.874	0.713	0.762
	Q (t-1), Q (t-2)	0.0237	0.0207	0.846	0.870	0.716	0.755
	Q (t-1), Q (t-2), Q (t-3)	0.0235	0.0201	0.849	0.878	0.721	0.77
	Q (t-1), R(t-1)	0.0228	0.0197	0.858	0.883	0.737	0.778
	Q (t-1), Q (t-2), R(t-1)	0.0229	0.0201	0.857	0.879	0.735	0.769
	Q (t-1), Q (t-2), Q (t-3), R(t-1)	0.0222	0.0191	0.867	0.892	0.734	0.791
ANN-WOA	Q (t-1)	0.0238	0.0205	0.844	0.873	0.713	0.760
	Q (t-1), Q (t-2)	0.0240	0.0215	0.842	0.860	0.709	0.737
	Q (t-1), Q (t-2), Q (t-3)	0.0237	0.0205	0.846	0.873	0.717	0.759
	Q (t-1), R(t-1)	0.0225	0.0203	0.862	0.877	0.744	0.765
	Q (t-1), Q (t-2), R(t-1)	0.0220	0.0258	0.869	0.823	0.755	0.622
	Q (t-1), Q (t-2), Q (t-3), R(t-1)	0.0222	0.0186	0.868	0.896	0.755	0.803

نکته قابل توجه این است که هر چه خط برازش داده شده میان داده‌ها نزدیکتر به زاویه ۴۵ درجه با محورهای مختصات باشد، دقت مدل بیشتر است (شکل ۳-الف و ب).

نمودارهای پراکنش اندازه‌های مشاهده‌ای در مقابل اندازه‌های پیش‌بینی شده به وسیله ANN-WOA در شکل ۳ آورده شده است. این نتایج نشان‌دهنده همبستگی زیاد میان نتایج مدل با اندازه‌های واقعی بود.

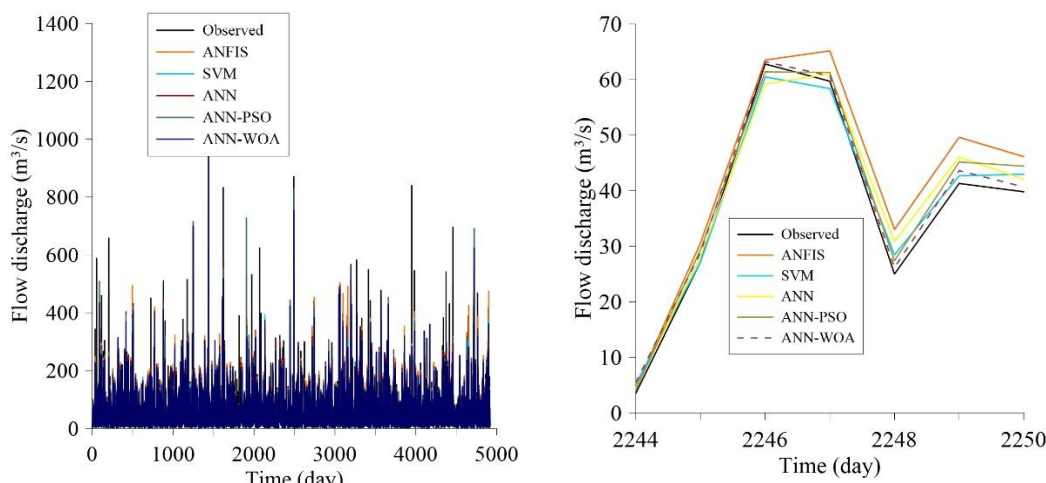


شکل ۳- نمودارهای پراکنش اندازه‌های مشاهده‌ای آب‌دهی در مقابل اندازه‌های پیش‌بینی شده به وسیله مدل بهینه ANN-WOA در مراحل آموزش و صحت‌سنجی.

Figure 3- Distribution charts of observed values of daily flow versus predicted values by the optimal ANN-WOA model in the training and validation stages.

برخی از داده‌ها دشوار باشد، این مدل‌ها می‌توانند با در اختیار داشتن کمترین سنج‌های ورودی، در پیش‌بینی آب‌دهی رود عملکرد قابل قبولی داشته باشند. برای درک بهتر، در شکل ۴ تغییر اندازه‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای آب‌دهی روزانه رود به وسیله مدل‌ها نسبت به زمان برای بخشی از بازه مطالعه شده آورده شده است. بر پایه شکل ۴ نتایج مدل ترکیبی شبکه عصبی و دستورالعمل نهنگ با داده‌های واقعی هم‌خوانی بیشتر و خطای کمتری داشت. نمودارهای سری زمانی شکل ۴ نشان داد که اگرچه عملکرد مدل‌ها در پیش‌بینی آب‌دهی رود قابل قبول بود اما، در آب‌دهی‌های زیاد ضعیف عمل کردند و اندازه پیش‌بینی شده اختلاف قابل توجهی با اندازه‌های واقعی داشت.

نتایج این پژوهش نشان داد برای پیش‌بینی آب‌دهی روزانه در ایستگاه پل دختر عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی قابل قبول بودند. با این حال، عملکرد مدل ANN-WOA با کمترین اندازه‌های RMSE در مراحل آزمایش و صحت‌سنجی، بهتر بود. عملکرد مدل SVM نیز با داشتن ضریب همبستگی زیاد و خطای کمتر در مقایسه با دیگر مدل‌ها، خوب بود. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های صمدی و فتح‌آبادی (۲۰۱۸) و پریسوج و همکاران (۲۰۲۰) هم‌راستا است. می‌توان گفت این مدل، با استفاده از اصل استقرای کمینه‌سازی خطای ساختاری، به دنبال یک جواب بهینه کلی است و مطلوب‌ترین جواب ممکن را ارائه می‌دهد. از این‌رو، زمانی که کمبود داده‌های آماری وجود دارد یا ثبت



شکل ۴- نمودار سری زمانی اندازه‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای آب‌دهی روزانه به‌وسیله دو مدل ANFIS و SVM
Figure 4- Time series graph of observed and calculated values of daily flow by ANFIS and SVM model.

همراه است. باید توجه داشت که کیفیت و ماهیت داده‌ها نقش مهمی در عملکرد این مدل‌ها دارد. معمولاً داده‌هایی که برای مدل‌سازی استفاده می‌شوند، محدود و ناقص هستند و ممکن است تأثیر منفی بر دقت پیش‌بینی داشته باشند. در نتیجه عملکرد مدل مطلوب نخواهد بود. همچنین، تغییرات ناگهانی در آبخیز مانند سیلاب و بارش‌های سیل آسا می‌تواند موجب کاهش دقت مدل در پیش‌بینی آب‌دهی رود شود. در این پژوهش تلاش شد با پیش‌پردازش و پالایش داده‌ها، اندازه خطای ناشی از ماهیت داده، کاهش یابد. با این حال نتایج نشان دادند، عملکرد مدل‌ها در پیش‌بینی آب‌دهی‌های زیاد مطلوب نبود. پیشنهاد می‌شود از دیگر مدل‌های یادگیری ماشین به‌ویژه مدل‌های جدید یادگیری عمیق و دستورالعمل‌های بهینه‌سازی دیگر استفاده شود و خروجی‌ها با نتایج این پژوهش مقایسه شود. سرانجام می‌توان گفت استفاده از مدل‌های هوشمند در تحلیل مباحث آب‌شناختی و مدیریت منابع آبی مفید و کم هزینه بودند و می‌توان آنها را جایگزین مناسبی برای مدل‌های مفهومی و آب‌شناختی که معمولاً پرهزینه هستند، دانست.

سپاس‌گزاری

نویسندگان به این وسیله از سازمان هواشناسی کشور و هم‌چنین سازمان آب و برق استان خوزستان که ما را

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، عملکرد مدل‌های هوشمند در پیش‌بینی آب‌دهی روزانه آبخیز کشکان در استان لرستان بررسی شد. از این رو، داده‌های بارش و آب‌دهی رود ثبت‌شده در ایستگاه پل‌دختر، به‌عنوان انتهایی‌ترین نقطه آبخیز، جمع‌آوری شدند. اندازه‌های مشاهده‌ای آب‌دهی رود با اندازه‌های برآوردشده به‌وسیله مدل‌های ساختار استنتاج فازی عصبی تطبیقی، مدل ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی، مدل‌های ترکیبی شبکه عصبی-دستورالعمل نهنگ و مدل ترکیبی شبکه عصبی-دستورالعمل ازدحام ذرات مقایسه شدند. بررسی معیارهای ارزیابی آماری نشان داد دقت مدل‌ها با ورودی‌های گوناگون، متفاوتی بود. نتایج بررسی همه مدل‌ها در این پژوهش نشان داد که آب‌دهی رود در یک (Q-1)، دو (Q-2) و سه (Q-3) روز گذشته و بارش یک روز گذشته (P-1)، بیش‌ترین همبستگی را با آب‌دهی روزانه نشان داد. نتایج این پژوهش نشان داد استفاده از دستورالعمل‌های بهینه‌سازی نهنگ و ازدحام ذرات برای آموزش شبکه عصبی، سبب شد تا حد زیادی دقت مدل افزایش یابد. سرانجام، مدل ANN-WOA ($RMSE=0.1186$ ، $NE=0.803$ و $R^2=0.896$) به‌عنوان برترین مدل انتخاب شد. اگرچه استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی آب‌دهی رود می‌تواند مفید باشد، اما با چالش‌ها و محدودیت‌هایی

مشارکت نویسندگان

فاطمه عوض‌پور: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله.
محمدرضا هادیان: راهنمایی و مشاوره، بازبینی متن مقاله، بررسی نتایج.
علی طالبی: راهنمایی و مشاوره، بازبینی متن مقاله، بازبینی نتایج.

در انجام این پژوهش یاری کردند، صمیمانه تشکر می‌کنم.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منفعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

فهرست منابع

- Abdollah Pour Azad MR, Sattari MT. 2015. Forecasting daily river flow of Ahar Chay River using artificial neural networks (ANN) and comparison with Adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS). *Journal of Water and Soil Conservation*. 22(1):287-298. (In Persian). [https://doi : 20.1001.1.23222069.1394.22.1.15.7](https://doi.org/10.1001.1.23222069.1394.22.1.15.7)
- Asadabadi AS, Dinpazhuh Y, Mirabasi Najafabadi R. 2014. Forecasting the average daily discharge of the Beheshtabad River using wavelet analysis. *Journal of Water and Soil Science*. 28(3): 534-45. (In Persian). [https://doi: 20.1001.1.23222069.1394.22.1.15.7](https://doi.org/10.1001.1.23222069.1394.22.1.15.7)
- Buyukyildiz M, Kumcu SY. 2017. An estimation of the suspended sediment load using adaptive network based fuzzy inference system, support vector machine and artificial neural network models. *Journal of Water Resources Management*. 31(5): 1343-1359. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1581-1>
- Choubin B, Moradi E, Golshan M, Adamowski J, Sajedi Hosseini F, Mousavi A. 2019. An ensemble prediction of flood susceptibility using multivariate discriminant analysis, classification and regression trees, and support vector machines. *Journal of Science of the Total Environment*. 651(2/15): 2087-2096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.064>
- Ditthakit P, Sirimon P, Nureehan S, Jakkarin W, Thai Th, and Quoc BP. 2023. Comparative study of machine learning methods and GR2M model for monthly runoff prediction. *Journal of Ain Shams Engineering*. 14(4) 101941. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101941>
- Emami H, Emami S, Heidari Tashe Kabud SH. 2019. Prediction suspended sediment load of river using meta-heuristic algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage*. 13(5): 1426-1438. (In Persian). [https://doi: 20.1001.1.20087942.1398.13.5.21.5](https://doi.org/10.1001.1.20087942.1398.13.5.21.5)
- Eskandari A, Nouri R, Vesali Naseh MR, Saeedi F. 2019. Uncertainty evaluation of ANN and ANFIS models in estimating the inflow to Rais Ali Delwari dam. *Journal of Environmental Science and Technology*. 21(7):34-47. (In Persian). [https://doi: 10.22034/jest.2020.20068.2909](https://doi.org/10.22034/jest.2020.20068.2909)
- Falamaki A, Eskandari M, Baghlani A, Ahmadi SA. 2012. Modeling total sediment load in rivers using artificial neural networks. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*. 2(3):13-25. (In Persian). <https://sid.ir/paper/403921/fa>
- Ghafari GH, Vafakhah M. 2013. Simulation of rainfall-runoff process using artificial neural network and fuzzy-adaptive neural system (case study: Hajighoshan watershed). *Journal of Watershed Management Research*. 4(8):120-136. (In Persian). <https://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-321-fa.html>
- Hakimi Khansar H, Parsa J, Momeni Keleshteri O, Karami N, Khoshdel Sangdeh M. 2024. Extended estimation of daily inflow of Sefidroud dam using meta-heuristic algorithms combined with fuzzy neural inference system. *Journal of Civil Engineering, Amirkabir*. 56(1): 03-22. (In Persian). [https://doi: 10.22060/ceej.2024.21634.7784](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.21634.7784)
- Jang, J-SR. 1993. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*. 23(3): 665-85.
- Joudi HA, Kadkhoda Hosseini M, Akhavan S, Nozari H. 2015. Evaluation of AWAT and SVM models in the simulation of Ligvanchai river runoff. *Journal of Water and Soil Science*. 26(4/1): 137-150. (In Persian). <https://civilica.com/doc/1587524>
- Katipoğlu OM. 2023. Modeling the effect of meteorological variables on streamflow estimation: application of data mining techniques in mixed rainfall-snowmelt regime Munzur River.

- Türkiye. *Journal of Environmental Science and Pollution Research*. 30(4): 96312–96328. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29220-2>
- Latif SD, Chong KL, Ahmed AN, Huang YF, Sherif M, Shafie A EL. 2023. Sediment load prediction in Johor River: deep learning versus machine learning models. *Journal of Applied Water Science*. 13(3): 79-93. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01874-w>
- Malik A, Tikhamarine Y, Souag-Gamane D, Rai P, Sammen SS, Kisi O. 2021. Support vector regression integrated with novel meta-heuristic algorithms for meteorological drought prediction. *Journal of Meteorology and Atmospheric Physics*. 133(2): 891–909. <https://doi.org/10.1007/s00703-021-00787-0>
- Marcé R, Comerma M, García JC. Armengol J. 2004. A neuro-fuzzy modeling tool to estimate fluvial nutrient loads in watersheds under time-varying human impact. *Limnology and Oceanography Methods*, 2(11): 342-355. <https://doi.org/10.4319/lom.2004.2.342>
- Memari M, Harifi M, Khalili A. 2020. Improving the classification performance of polynomial neural network using whale algorithm. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 20(2):145-154. (In Persian). <https://sid.ir/paper/959517/fa>
- Mirjalili S, Lewis A. 2016. The whale optimization algorithm. *Journal of Advances in Engineering Software*. 95(6):51-67 <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>
- Mohammadi B, Moazenzadeh R. 2019. Prediction of stream flow using intelligent hybrid models in monthly scale (case study: Zarrin roud River). *Journal of Environmental Science and Technology*. 21(9):71-81. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/jest.2020.24315.3331>.
- Moriasi DN, Jeffrey GA, Michael WVL, Ronald LB, Daren H, Tamie LV. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*. 50(3): 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nazeri Tahroudi M, Hashemi SR, Ahmadi F, Nazeri Tahroudi Z. 2016. Examining the accuracy of ANFIS, SVM and GP models in modeling the river flow discharge. *Journal of Echohydrology*. 3(3):347-361. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ije.2016.60024>
- Nie Y, Sun J, Jiehua M. 2023. Seasonal prediction of summer extreme precipitation frequencies over southwest China based on machine learning. *Journal of Atmospheric Research*. 294 (5): 106947. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106947>
- Nourani V, Alizadeh F, Roushangar K. 2015. Evaluation of a two-Stage SVM and spatial statistics methods for modeling monthly river suspended sediment load. *Journal of Water Resour Management*. 30(9):393-407. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1168-7>
- Parisouj P, Mohebzadeh H, Lee T. 2020. Employing machine learning algorithms for streamflow prediction: A case study of four River basins with different climatic zones in the United States. *Journal of Water Resource Management*. 34(3): 4113-4131. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02659-5>
- Samadi M, Fath Abadi A. 2018. Application of Time Series, ANN, and SVM Models in forecasting the Gorgan Dam inflow rate. *Journal of Environment and Water Engineering*. 4(4): 299-309. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/jewe.2018.128256.1256>
- Samantaray S, Sahoo A. 2022. Prediction of suspended sediment concentration using hybrid SVM-WOA approaches. *Journal of Geocarto Internationa*. 37(19): 5609-5635. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1920638>
- Shahhoseini Sh, Moosavi M, Mollajafari M. 2011. Evolutionary algorithms- fundamentals, applications, implementation. Tehran Press Center, Iran University of Science and Technology, Tehran, 590 p. (In Persian).
- Shahi Nejad B, Dehghani R. 2017. Evaluation and performance of support vector machine model in estimation of suspended sediment. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 8(29):25-34. (In Persian). https://www.waterjournal.ir/article_74207.html
- Studies on the modernization of the country's water comprehensive plan in the border watersheds of the West, Karkheh, Karun and Jarahi-Zahre. 2006. Ministry of Energy and Water Research Institute. pp. 52-58 (In Persian).
- Yu X, Liang SY, Babovic V. 2004. EC-SVM approach for real-time hydrologic forecasting. *Journal of Hydroinformatics*, 6 (3): 209–223. <https://doi.org/10.2166/hydro.2004.0016>



The performance evaluation of machine learning models and optimization algorithms for predicting the River Discharge of Kashkan River

Fatemeh Avazpour¹, Mohammad Reza Hadian², Ali Talebi³

1- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

3- Professor, Department of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

The simulation of river discharge at hydrometric stations to predict future flow discharge over specific time periods is an important issue typically addressed using hydrological time series associated with the respective station. To predict river discharge with the highest accuracy, three major groups of methods are commonly utilized: empirical and statistical methods, conceptual methods, and process-based approaches. Among data-driven methods, those based on artificial intelligence-based are prominent. The aim of this study was evaluating the performance of machine learning models, including SVM, ANFIS, and ANN, and assessing the performance of a neural network model trained with Whale Optimization Algorithm (WOA) and Particle Swarm Optimization (PSO) to predict flow discharge. In addition to evaluating the intelligent models, the impact of using optimization algorithms on the accuracy of river discharge predictions was also examined. Since input data have a significant impact on the performance of data-driven models, the criteria influencing the river discharge were identified, and the best combination of input variables for each model was determined.

Materials and Methods

In this study, to predict the daily discharge at the Poldokhtar hydrometric station located on the Kashkan River, discharge and precipitation data from 1971 to 2018 were collected, and Intelligent models, including Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), Support Vector Machine (SVM), Artificial Neural Network (ANN), and the hybrid model of Artificial Neural Network with Particle Swarm Optimization (ANN-PSO) and the hybrid model of Artificial Neural Network with Whale Optimization Algorithm (ANN-WOA) were employed. In the two hybrid models, efforts were made to adjust the criteria of the artificial neural network using metaheuristic algorithms, and their impact on the performance of the ANN model was examined.

Article Type: Research Article

***Corresponding Author E-mail:** mr_hadian@yazd.ac.ir

Citation: Avazpour, F., Hadian, M.R., Talebi, A. 2025. Evaluation of the performance of machine learning models and optimization algorithms in predicting flow discharge of Kashkan River. *Watershed Management Research*. 38(1): 1-18.

DOI: 10.22092/WMRJ.2024.365128.1579

Received: 06 March 2024, **Received in revised form:** 09 May 2024, **Accepted:** 20 June 2024

Published online: 21 March 2025

Watershed Management Research, Vol.38, No.1, Ser. No:146, Spring 2025, pp. 1-18.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center ©Author(s)



Additionally, this study investigated the impact of river discharge and precipitation data, along with their time lags (data from previous days), and combinations of these metrics as input variables for the models. To determine the best combination of input variables, statistical methods such as the Autocorrelation Function (ACF), Partial Autocorrelation Function (PACF), and Pearson Correlation Coefficient (PCC) were employed. After applying the effective inputs and training the mentioned intelligent models, their performance in predicting river discharge was evaluated by comparing RMSE, R^2 , and NE metrics.

Results and Discussion

The evaluation of all models in this study showed that the river discharge of one day (Q-1), two days (Q-2), and three days (Q-3) ago, along with the precipitation of one day ago (P-1), exhibited the highest correlation with the river's daily discharge. Overall, all models demonstrated acceptable accuracy in modeling the river discharge in the Kashkan watershed. According to the results, the highest accuracy in predicting daily discharge was achieved by the ANN-WOA model, with the highest coefficient of determination ($R^2 = 0.896$), Nash-Sutcliffe efficiency (NE = 0.803), and the lowest error (RMSE = 0.0186).

Subsequently, the SVM model, using a radial basis kernel function with parameters $C=4$, $\gamma=1$, and $\epsilon=0.001$ demonstrated superior performance, with a coefficient of determination ($R^2 = 0.895$), Nash-Sutcliffe efficiency (NE = 0.801), and an error (RMSE = 0.0187). Then, the ANN-PSO and ANN models ranked third and fourth, respectively. The results indicated that using metaheuristic optimization algorithms significantly improved the accuracy of the ANN model, making it a suitable tool for neural network training. The evaluation of different ANFIS structures revealed that triangular and Gaussian functions performed better for modeling river discharge in the study area. On the other hand, the error of this model, with values of RMSE=0.023 and NE=0.76 was higher compared to the other models.

Conclusion and Suggestions

This study demonstrated that machine learning models, such as SVM, ANFIS, and ANN, exhibited acceptable accuracy in predicting river discharge. Adjusting neural network parameters using optimization algorithms like WOA and PSO significantly enhanced the performance of the ANN model. Finally, it can be concluded that these models can serve as suitable alternatives to conceptual and hydrological models for addressing hydrological and discharge-related issues. It is recommended to train the SVM and ANFIS models using the PSO and WOA algorithms and then compare the results with the findings of this study.

Keywords: Kashkan Watershed, Rainfall-Runoff, Particle Swarm Optimization, Whale Optimization Algorithm, Artificial Intelligence

Article Type: Research Article

Acknowledgement

The authors sincerely thank the Meteorological Organization and the Khuzestan Water & Power Authority for their collaboration in data collection.

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

Fatemeh Avazpour: Conceptualization, performing software/statistical analyses, drafting the initial manuscript.

Mohammadreza Hadian: Supervision and guidance, reviewing the manuscript, verifying results.

Ali Talebi: Supervision and guidance, reviewing the manuscript, verifying results.



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آب‌بخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

تعیین کمی سهم خشک‌سالی و عامل‌های انسانی بر افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان کوه‌دشت استان لرستان

رضا چمن‌پیرا^{۱*}، مهران زند^۲، ابراهیم کریمی‌سنگ‌چینی^۳، الهام داودی^۴

۱ و ۳- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات حفاظت خاک آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران
۲- دانشیار پژوهشی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
۴- محقق، بخش تحقیقات حفاظت خاک آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

در استان لرستان به دلیل افت شدید سطح آب زیرزمینی آبخوان کوه‌دشت، در زمره مناطق برداشت ممنوع آب است. هدف این پژوهش تبیین و توصیف علت‌های افت سطح آب زیرزمینی آبخوان کوه‌دشت بود. همچنین، سهم عامل‌های طبیعی و ارتباط میان رخداد و تأخیر زمانی خشک‌سالی‌های هواشناسی و زمین‌آب‌شناختی بررسی شد.

مواد و روش‌ها

به منظور تعیین وضعیت رطوبتی سالانه منطقه، شاخص‌های بارندگی SPI و آب زیرزمینی GRI محاسبه شدند. ضریب‌های همبستگی میان شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی سالانه، فصلی، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه با میانگین بلندی سطح آب زیرزمینی و شاخص GRI در ماه متناظر، محاسبه شد. سپس، بیلان آب زیرزمینی بررسی و نوع محصولات زراعی منطقه تعیین شد. سرانجام، رابطه همبستگی میان اندازه مصرف آب با میانگین بلندی سطح آب زیرزمینی تعیین و تأثیر اندازه برداشت آب برای هر محصول بر تغییرات کمی منابع آب زیرزمینی بررسی شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: chamanpira2000@gmail.com

استناد: چمن‌پیرا، ر.، زند، م.، کریمی‌سنگ‌چینی، ا.، داودی، ا. ۱۴۰۴. تعیین کمی سهم خشک‌سالی و عامل‌های انسانی بر افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان کوه‌دشت استان لرستان. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۸(۱): ۳۷-۱۹.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2024.365631.1584

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۴، دوره ۳۸، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۴۶، بهار ۱۴۰۴، صفحه‌های ۱۹ تا ۳۷.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



نتایج و بحث

نتایج نشان داد ۳۱/۰۲٪ از کاهش آب آبیگرها مربوط به رخداد خشک‌سالی‌ها و ۶۸/۹۸٪ مربوط به عامل‌های انسانی (کشاورزی، شرب و صنعت) بود. حجم آب ورودی به آبخوان ۲۲/۴۶ میلیون مترمکعب و حجم آب مصرفی در بخش کشاورزی، شرب و صنعت ۶۱/۰۹ میلیون متر مکعب بود. از این رو، اندازه کاهش آب و اضافه برداشت از آبخوان ۳۸/۳۶ میلیون مترمکعب بود که از این اندازه ۱۱/۸۶ میلیون مترمکعب مربوط به خشک‌سالی و ۲۶/۴۷ میلیون مترمکعب مربوط به عامل‌های انسانی بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر پایه نتایج این پژوهش عامل اصلی افت سطح آب زیرزمینی، نوع مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، به‌ویژه در بخش کشاورزی بود. با توجه به تأخیر زمانی میان رخداد خشک‌سالی‌های هواشناسی و آب زیرزمینی فرصت مناسبی برای مدیریت و جلوگیری از افت سطح آب زیرزمینی ایجاد خواهد شد. از این رو، تغییر در مدیریت مصرف آب زیرزمینی از راه تغییر الگوی کشت افزون بر کاهش اثرات منفی خشک‌سالی، کمبود آب آبخوان را در بلندمدت برطرف می‌کند و سرانجام بیلان آب زیرزمینی را افزایش می‌دهد. پیشنهاد می‌شود با برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت الگوی مصرف آب به‌ویژه در بخش کشاورزی اصلاح شود و متناسب با اندازه آب تجدیدپذیر سالانه برای مصارف گوناگون برنامه‌ریزی و اقدام شود.

واژگان کلیدی: آبخوان کوهدشت، اضافه برداشت، بیلان آب زیرزمینی، شاخص GRI، شاخص SPI، مدیریت

مقدمه

وضعیت رطوبتی و حرارتی خاک، الگوی گردش هوا و وزش باد پایدار می‌شود و گسترش می‌یابد (سیمایی و کشتکاری ۲۰۱۲). از دیدگاه سازمان ملل، بحران مدیریت منابع آب پس از افزایش جمعیت به‌عنوان دومین چالش اصلی انسان‌ساخت جهان شناخته‌شده است. افت کمی و کیفی آب زیرزمینی یکی از اثرات خشک‌سالی و افزایش برداشت از آبخوان‌هاست (فاریابی و مظفری‌فرد ۲۰۱۷). شاخص‌های پرشماری برای ارزیابی خشک‌سالی ارائه‌شده است که هر یک بر اساس متغیرهای هواشناسی و آب‌شناختی (SPI، SDI، SPEI و GRI) می‌باشند (میراکبری و همکاران ۲۰۱۸). آبخوان‌های ایران سالانه با کاهش ۵/۵ میلیارد مترمکعبی مواجه هستند که این موضوع حساسیت بیشتر آب‌های زیرزمینی را نسبت به استفاده‌های بی‌رویه روشن می‌سازد (اسدزاده و همکاران ۲۰۱۶). برای کاهش اثرات ویرانگر خشک‌سالی و حفاظت از آب زیرزمینی به رویکردهای پیش‌گیرانه نیاز است؛ اما اکثر رویکردهای کاهش اثرات خشک‌سالی ناکارآمد است و بر تأمین کمبود آب که در دوره خشک‌سالی

در دنیای امروز پدیده خشکی و خشک‌سالی بلای بدون پیشگیری است و انسان با تمام پیشرفت‌های علمی و فنی هنوز نتوانسته زمان و محل رخداد خشک‌سالی‌های شدید را پیش‌بینی کند. به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی، در بسیاری از نقاط ایران، کمبود آب و خشک‌سالی یک تهدید حتمی و اجتناب‌ناپذیر است؛ اما می‌توان با ارائه الگوهای بهینه مدیریتی اثرات و عوارض پیچیده آن را تعدیل کرد و مانع بروز بحران آب شد (ثمین و همکاران ۲۰۱۲). خشک‌سالی به دلیل گستردگی مقیاس زمان و فضای عمل، اصلی‌ترین عامل محیطی کمبود و اختلال جریان آب، گسیختگی توازن بوم‌شناخت و فقر غذایی به‌شمار می‌آید (ابراهیمی و همکاران ۲۰۰۹). با این وجود، کشورهای جهان در صدد دستیابی به توسعه پایدار و حفظ وضعیت موجود هستند. بدون تردید باید در بهره‌برداری بهینه از منابع آب موجود، خشک‌سالی را به‌عنوان یک عارضه و خطر چندبعدی و خودگستر، در نظر گرفت. خشک‌سالی آب و هوایی، زمانی که در یک منطقه لنگر اندازد، با تغییر

۴۸ ماهه معنی‌داری بود. چمن‌پیرا و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر خشک‌سالی بر منابع آب زیرزمینی دشت الشتر را در دوره ۱۳۷۰-۱۳۸۹ با استفاده از شاخص SPI بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص SPI در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه بدون تأخیر زمانی با میانگین تراز سطح سفره آب زیرزمینی و شاخص GRI در سطح ۰/۰۱٪ معنی‌دار بود. ناصرزاده و احمدی (۲۰۱۷) در بررسی عملکرد شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی در ارزیابی خشک‌سالی و پهنه‌بندی آن، دریافتند که شاخص SPI برای نشان دادن خشک‌سالی‌های شدید در اولویت جایگاه نخست بود. پورهت و همکاران (۲۰۱۵) با بررسی و تفکیک دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی در سرشاخه‌های آبخیز کرخه (آبخیز قره‌سو) نشان دادند که شاخص‌های SPI و GRI قابلیت مناسبی در تبیین و توصیف خشک‌سالی هواشناسی و زمین‌آب‌شناختی، کمی کردن کمبود بارش در مقیاس‌های زمانی گوناگون و بررسی اثر آن بر منابع آب زیرزمینی را دارد. عباسی‌نیا و همکاران (۲۰۲۱) برای ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی و خشک‌سالی آب زیرزمینی در دشت مهران استان ایلام از تحلیل و مقایسه شاخص‌های SPI و GRI استفاده کردند و دریافتند که در یک دوره آماری ۲۵ ساله چهار دوره خشک‌سالی هواشناسی شدید و یک دوره خشک‌سالی آب زیرزمینی شدید رخ داده است. شدیدترین خشک‌سالی‌ها در دوره آماری ۷۵-۷۴ تا ۹۷-۹۶ و در هر دو دوره مربوط به سال‌های ۱۳۹۱-۱۳۹۰ بوده است. نتایج مقایسه شاخص‌های SPI و GRI به‌وسیله بهزادی و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد اگرچه بارندگی در دشت مهیار جنوبی آبخیز تالاب گاوخونی، در سال‌های ۸۲-۸۱ تا ۹۶-۹۵ رخ داده است؛ اما افت سطح آب زیرزمینی متوقف‌نشده است. بر اساس نتایج پژوهش‌های انجام‌شده، رخداد خشک‌سالی‌های پی در پی سبب افت سطح سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود و رابطه میان خشک‌سالی هواشناسی و خشک‌سالی آب زیرزمینی با تأخیرهای زمانی ماهانه و سالانه معنی‌دار است. اما بیشتر

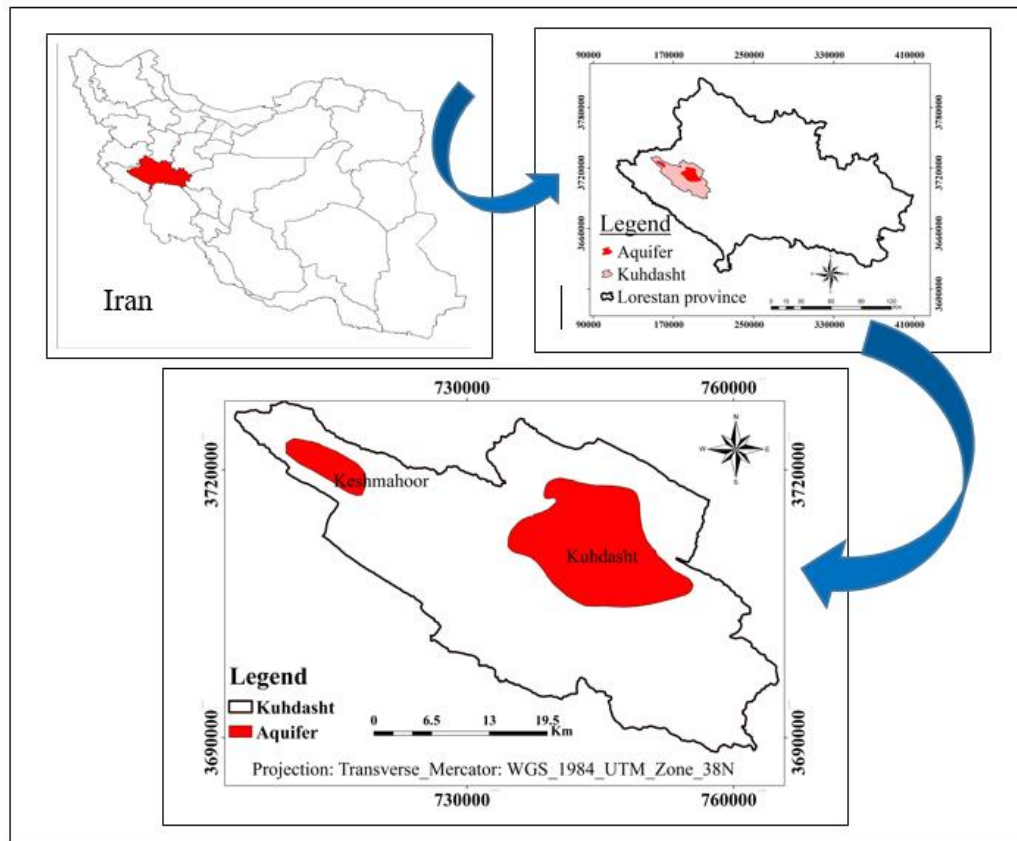
ایجادشده، از منابع آب زیرزمینی تمرکز دارد و به مدیریت همزمان آب زیرزمینی و خشک‌سالی توجهی نشده است (حبیب‌آبادی و همکاران ۲۰۲۳). توجه به اعمال مدیریت صحیح و کاهش پیامدهای خشک‌سالی نیازمند برنامه‌ریزی و اجرای اقدام‌های پیشگیرانه در مقابله با پدیده خشک‌سالی است که خود مستلزم به‌کارگیری دانش کافی در پیش‌بینی خشک‌سالی‌ها است (بیات ورکشی و همکاران ۲۰۱۸). تاکنون شاخص‌های بسیاری برای پیش‌بینی خشک‌سالی ارائه شده است، اما برخی از آن‌ها به دلیل سادگی و قابل اجرا بودن، شانس بیشتری دارند (مندیسینو و همکاران ۲۰۰۸). به‌عنوان مثال شاخص SPI، که به‌وسیله مک‌کی و همکاران (۱۹۹۳) برای پیش‌بینی خشک‌سالی هواشناسی تدوین شد برای هشدار اولیه و کمک به ارزیابی شدت خشک‌سالی اهمیت زیادی دارد (مساعدی و همکاران ۲۰۰۹). تود (۱۹۸۰) معتقد بود که نوسان سطح ایستابی آبخوان‌ها الگوهای فصلی و سالانه دارد و غالباً متأثر از بارندگی و پساب‌های کشاورزی است و خشک‌سالی آب‌شناختی در مقایسه با خشک‌سالی هواشناسی و کشاورزی معمولاً با تأخیر زمانی رخ می‌دهد. محمدی و شمسی‌پور (۲۰۰۲) تأثیر خشک‌سالی‌های گذشته بر افت منابع آب زیرزمینی دشت‌های شمال همدان را بررسی کردند و نتیجه گرفتند، خشک‌سالی‌های هواشناسی با تأخیر زمانی نه ماهه باعث افت سطح آب‌های زیرزمینی شد. محمدی‌قلعه‌نی و ابراهیمی (۲۰۱۱) گزارش کردند رابطه میان شاخص SPI ایستگاه احمدآباد در دشت ساوه و سطح سفره آب زیرزمینی در مقیاس ۲۴ ماهه در سطح ۰/۰۱٪ معنی‌داری بود. ناصرزاده و احمدی (۲۰۱۲) عملکرد شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی را بررسی کردند و دریافتند که شاخص SPI برای نشان دادن خشک‌سالی‌های شدید در اولویت نخست بود. یاسمنی و همکاران (۲۰۱۲) برای بررسی تأثیر خشک‌سالی هواشناسی بر سطح آب زیرزمینی دشت تربت‌جام خراسان رضوی از شاخص GRI استفاده کردند و گزارش کردند که رابطه میان خشک‌سالی هواشناسی و خشک‌سالی آب زیرزمینی با تأخیر زمانی

وجود دارد. دشت کوهدشت اصلی‌ترین آبخوان منطقه مطالعه شده است و منابع آب قابل توجهی دارد. از این رو، آبخیز دشت کوهدشت به عنوان منطقه مطالعه شده انتخاب شد. سفره دشت کوهدشت از نوع آزاد و به شکل بیضوی است که در رسوبات آبرفتی است. بر اساس بررسی نقشه زمین‌شناسی و مشاهدات ثبت شده در چاه‌های بهره‌برداری، سنگ کف مارن امیران و برخی مناطق از کنگلومرای کشکان تشکیل شده است. بیشترین ضخامت آبرفت در ژرف‌ترین قسمت‌های دشت (بخش میانی) ۱۷۰ متر است و میانگین ضخامت آبخوان کوهدشت ۷۸ متر برآورد شده است. مساحت این آبخوان ۲۴۸/۸ کیلومتر مربع است و میانگین بلندی دشت‌ها و بلندی‌ها به ترتیب ۱۲۶۱/۱ و ۱۳۹۶/۲ متر است و برای کل منطقه مطالعه شده ۱۳۶۰/۱ متر نسبت به سطح دریاهای آزاد است. میانگین بارش منطقه در دوره آماری ۱۳۹۹-۱۳۶۷ ۴۷۰ میلی‌متر است. در این دوره کمترین بارش سالانه ۲۲۶/۵ میلی‌متر و مربوط به سال آبی ۱۳۸۶-۱۳۸۷ است و بیشترین آن ۸۸۷/۲ میلی‌متر مربوط به سال آبی ۱۳۷۰-۱۳۷۱ است. برای محاسبه شاخص‌های استفاده شده در این پژوهش، از آمار بلندمدت بارندگی ایستگاه‌های منطقه و داده‌های ماهانه چاه‌های مشاهده‌ای دشت کوهدشت در دوره آماری مشترک ۱۳۹۹-۱۳۶۷ استفاده شد. سفره آب زیرزمینی در دشت‌های کوهدشت و کشماهور تشکیل شده است که مرز آن با استفاده از محل چاه‌های مشاهده‌ای و بهره‌برداری، داده‌های چاه پیمایی و آب‌دهی چاه‌های موجود و زمین‌شناسی منطقه مشخص شد (شرکت مهندسی مشاور سنگاب زاگرس، ۲۰۱۲).

رویکردهای مدیریت خشک‌سالی وابسته به رخدادهای تصادفی دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی است. توجه به مدیریت همزمان خشک‌سالی و عامل‌های انسانی در کاهش اثرات زیانبار خشک‌سالی‌ها بسیار مؤثر است. غفلت از نقش عامل‌های انسانی که بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی را با چالش جدی مواجه کرده است فشار برداشت را در شرایط خشک‌سالی تشدید می‌کند و سبب نابودی آبخوان‌ها می‌شود. وضعیت کشاورزی آبی حاکم بر دشت کوهدشت عمدتاً به آبخوان وابسته است و تخلیه بیش از حد منابع آب زیرزمینی و رخداد خشک‌سالی‌های پی در پی در سال‌های گذشته، افزون بر افت شدید سطح سفره آب زیرزمینی سبب ایجاد وضعیت بحرانی حاکم بر آبخوان کوهدشت شده است. این پژوهش با هدف تعیین سهم خشک‌سالی‌های هواشناسی و عامل‌های انسانی بر کاهش سطح آب زیرزمینی دشت کوهدشت، و تعیین دلیل‌های رخداد خشک‌سالی‌های طولانی‌مدت انجام شد. باید توجه داشت که بیشتر از ۵۰٪ از آب لازم در بخش کشاورزی منطقه مطالعه شده کوهدشت به وسیله منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود؛ از این رو، اجرای این پژوهش در تبیین و توصیف خشک‌سالی‌های هواشناسی و تعیین علت‌ها و عامل‌های افت سطح آب زیرزمینی به منظور برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه بهره‌برداری از منابع آب بسیار حائز اهمیت است. از سوی دیگر ارائه نتایج به دست آمده، گام مهمی در راستای برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه بهره‌برداری از منابع آب منطقه خواهد بود.

مواد و روش‌ها

در منطقه مطالعه شده کوهدشت دو دشت به نام‌های کوهدشت در شمال و کشماهور در نواحی شمال غرب



شکل ۱- منطقه مطالعه‌شده در کوهدشت.

Figure 1- The study area of Kohdasht.

همگنی، روی داده‌های بارندگی ماهانه انجام شد و کمبود آماری با روش تفاضل و نسبت‌ها برطرف شد.

پس از جمع‌آوری اطلاعات و آمار بارندگی ایستگاه‌های انتخاب‌شده باران‌سنجی و همدید (جدول ۱)، آزمون

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های انتخاب‌شده.

Table 1- Description of selected stations.

Row	Station name	Long	Lat	elevation
1	Chamanjir	24829	3704599	1140
2	Gol-e-Zard	719097	3674072	680
3	Kuhdasht	704641	3695947	940
4	Kashkan	753340	3673051	650
5	Daretang	247350	3758130	1730
6	Nurabad	776923	3664441	1820

وضعیت رطوبتی بر حسب شاخص SPI تعیین شد. طبقه‌بندی و تعیین وضعیت رطوبتی در مدل GRI شبیه مدل SPI است؛ زیرا در هر دو روش از توزیع بهنجار استفاده‌شده است (نیکو و همکاران ۲۰۱۰). بنابراین برای محاسبه اندازه شاخص GRI همانند

به‌منظور تعیین وضعیت خشک‌سالی هواشناسی، شاخص SPI با استفاده از نرم‌افزار DIP (مرید و همکاران ۱۹۹۶) در مقیاس زمانی سالانه، فصلی و ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ماهه برای منطقه مطالعه‌شده محاسبه شد. سپس، با توجه به اندازه SPI، وضعیت رطوبتی برای هر بازه زمانی با استفاده از جدول

عامل‌های ورودی و خروجی آب در منطقه مطالعه شده بود.

$$\Delta V = P + Q_{SI} + Q_{UI} - E - Q_{SO} - Q_{UO} \quad (3)$$

P: حجم ریزش‌های جوی در منطقه بیلان (میلی‌متر)، Q_{SI}: حجم جریان‌های سطحی ورودی یا انتقالی به منطقه بیلان (مترمکعب)، Q_{UI}: حجم جریان‌های زیرزمینی ورودی یا انتقالی به منطقه بیلان، E: روش‌های گوناگون تبخیر (تبخیر از بارندگی، تبخیر از سطح آزاد آب، تبخیر از آب زیرزمینی، مصرف خالص) در منطقه بیلان (میلی‌متر)، Q_{SO}: حجم جریان سطحی خروجی یا انتقالی از منطقه بیلان، Q_{UO}: حجم جریان زیرزمینی خروجی یا انتقالی از منطقه بیلان، ΔV : تغییرات آبگیرها در آب‌های سطحی و زیرزمینی است.

تغییرات ذخیره آبخوان بر اساس اختلاف ورودی‌ها و خروجی‌ها و با نوسانات سطح آب زیرزمینی و لحاظ کردن ضریب ذخیره و مقایسه این دو، مشخص شد. بیلان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی کوه‌دشت با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد.

$$\Delta V = Q_{UI} + Q_P + Q_R + Q_I + Q_{SW} - Q_{OU} - Q_{EX} - Q_D - Q_{ET} \quad (4)$$

Q_{UI}: جریان زیرزمینی ورودی، Q_P: نفوذ از بارندگی بر سطح آبخوان، Q_R: تغذیه به‌وسیله جریان‌های سطحی، Q_I: نفوذ از آب مصرفی آبیاری، Q_{SW}: نفوذ از پساب صنایع، Q_{OU}: جریان زیرزمینی خروجی، Q_{EX}: تخلیه و برداشت به‌وسیله چاه، چشمه و قنات، Q_D: زهکشی آبخوان به‌وسیله رود، Q_{ET}: تبخیر از آب زیرزمینی است (واحدها بر حسب مترمکعب می‌باشد).

با توجه به نقشه‌های قابلیت انتقال و تراز آب زیرزمینی و استخراج اطلاعات لازم شامل طول جبهه ورودی و خروجی، شیب آبی آب زیرزمینی و اندازه میانگین قابلیت انتقال آبخوان در جبهه ورودی و خروجی، با استفاده از معادله داری (رابطه ۵)، حجم جریان زیرزمینی ورودی و خروجی محاسبه شد.

$$Q_{UI, UO} = T.L.i \quad (5)$$

Q: جریان ورودی یا خروجی بر حسب متر مکعب در روز T: میانگین قابلیت انتقال آبخوان (متر مربع در

شاخص SPI از رابطه ۱ برای آبخوان‌های مطالعه‌شده استفاده شد (مندیسینو و همکاران ۲۰۰۸).

$$GRI = \frac{D_{y,m} - \mu_{D,m}}{\sigma_{D,m}} \quad (1)$$

GRI: شاخص منابع آب زیرزمینی، D_{y,m}: اندازه‌های بلندی سطح آب زیرزمینی (متر) در سال y و ماه m، $\mu_{D,m}$: میانگین بلندی سطح آب زیرزمینی (متر) در ماه m و $\sigma_{D,m}$: انحراف معیار سطح آب زیرزمینی در ماه m است.

پس از محاسبه شاخص‌های نامبرده، به‌نحیجار بودن داده‌ها در سطح ۰/۰۵٪ با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در محیط نرم‌افزار SPSS Ver.20 انجام شد. به‌منظور بررسی شدت اثر بارندگی بر تغییرات کمی منابع آب زیرزمینی، ضریب همبستگی میان شاخص SPI با میانگین بلندی سطح آب زیرزمینی و شاخص GRI در مقیاس‌های زمانی گوناگون، با اعمال و بدون اعمال تأخیر زمانی محاسبه شد (یاسمنی و همکاران ۲۰۱۲؛ سیف و همکاران ۲۰۱۲). ضریب همبستگی میانگین بلندی سطح آب زیرزمینی و شاخص SPI با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد (خان و همکاران ۲۰۰۸).

$$P_{x,y} = \frac{cov(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2)$$

P_{x,y}: ضریب همبستگی میان شاخص معیارشده و میانگین بلندی سطح آب زیرزمینی، x: شاخص بارندگی معیارشده، y: میانگین بلندی سطح آب زیرزمینی (متر)، σ_x : انحراف معیار شاخص بارندگی معیارشده و σ_y : انحراف معیار میانگین سطح آب زیرزمینی است. محاسبات مربوط به ضریب‌های همبستگی میان متغیرها، پس از پردازش اولیه به‌وسیله Excel 2010، همگی در محیط نرم‌افزار MINITAB Ver.14 انجام شد. سپس، شاخص SPI با فراسنجه‌های کمی آب زیرزمینی، با تأخیرهای زمانی ماهانه، فصلی و سالانه بررسی و تحلیل شد. بیلان عمومی آب با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد. بیلان عمومی آب تعیین‌کننده سهم هر یک از

پس از تجزیه و تحلیل نتایج بیلان آب زیرزمینی، برای هر یک از بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت، حجم آب مصرفی و لازم تعیین شد. سپس، رابطه همبستگی میان اندازه مصرف آب با میانگین بلندی سطح آب زیرزمینی تعیین شد و تأثیر اندازه برداشت و حجم آب برای هر بخش مشخص شد. سرانجام، با استفاده از اطلاعات آماری به‌دست آمده و رسم نقشه‌های حرارتی^۱ تأثیر خشک‌سالی هواشناسی و عامل‌های انسانی بر افت سطح آب زیرزمینی آبخوان کوهدشت تعیین شد.

نتایج و بحث

رسم آبنگار واحد آبخوان کوهدشت

با استفاده از آمار ۱۵ چاه مشاهده‌ای در پایه زمانی ۳۲ سال، آبنگار واحد معرف آبخوان کوهدشت رسم شد (شکل ۲). با توجه به شیب منفی خط روند آبنگار واحد آبخوان کوهدشت، تراز آب ۱۹/۵۵ متر در طول دوره آماری کاهش یافت و در ۳۲ سال، میانگین افت سالانه ۶۱ سانتی‌متر برآورد شد.

روز) ، L : طول جبهه ورودی و یا خروجی جریان (متر)، i : شیب آبی آب زیرزمینی است.

شیب آبی آب زیرزمینی از تقسیم اختلاف بلندی دو منحنی تراز سطح آب بر میانگین فاصله میان دو منحنی متوالی بر حسب متر بر متر و با استفاده از رابطه ۶ محاسبه شد.

$$i = (H1 - H2) / x \quad (6)$$

x : فاصله میانگین میان دو منحنی متوالی تراز سطح آب (متر)، $H1$ و $H2$: بلندی دو منحنی متوالی تراز سطح آب (متر) است.

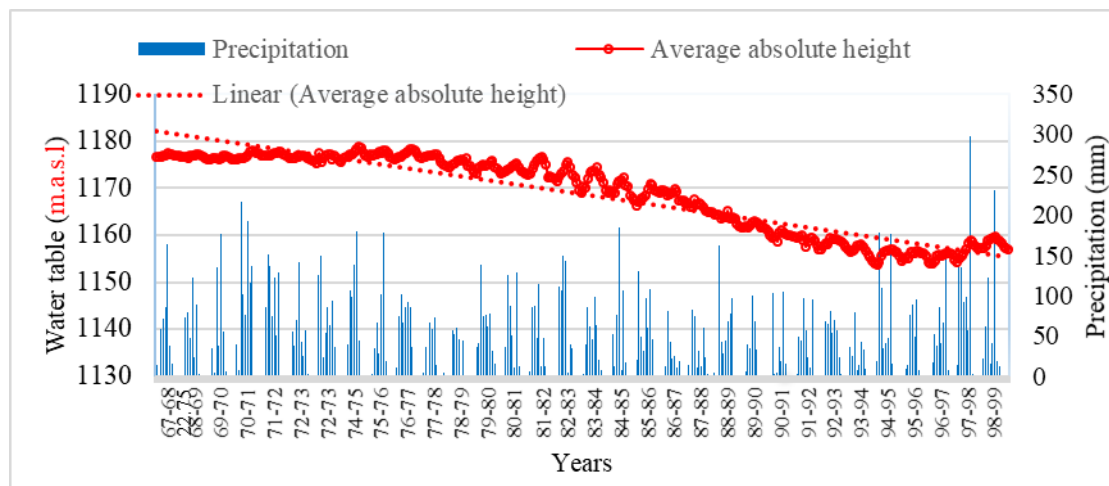
آبنگار معرف آبخوان نیز بر اساس روش تیسن و با استفاده از رابطه ۷ برای چاه‌های مشاهده‌ای در طول دوره آماری ۱۳۶۷-۱۳۹۹ تهیه شد (چمن‌پیرا و همکاران ۲۰۱۴).

$$H = \sum a_i \cdot h_i / A \quad (7)$$

H : رقم‌های آبنگار از سطح دریا (متر)، a_i : مساحت هر پلی‌گون (متر مربع) ، A : مساحت آبخوان، h_i : رقوم سطح آب در چاه مشاهده‌ای نام است.

در این پژوهش به‌منظور تعیین وضعیت بهره‌برداری به‌وسیله بررسی بیلان آب زیرزمینی از رابطه ۸ استفاده شد. در این رابطه با استفاده از تغییرات ذخیره آبخوان براساس اختلاف ورودی‌ها و خروجی‌ها با نوسانات سطح آب زیرزمینی (ΔH) و لحاظ کردن ضریب ذخیره (S) و A مساحت آبخوان (کیلومتر مربع) و مقایسه این دو با یکدیگر برآورد شد (شرکت مهندسی مشاور سنگاب زاگرس ۲۰۱۲).

$$\pm \Delta V = S \cdot A \cdot \Delta H \quad (8)$$

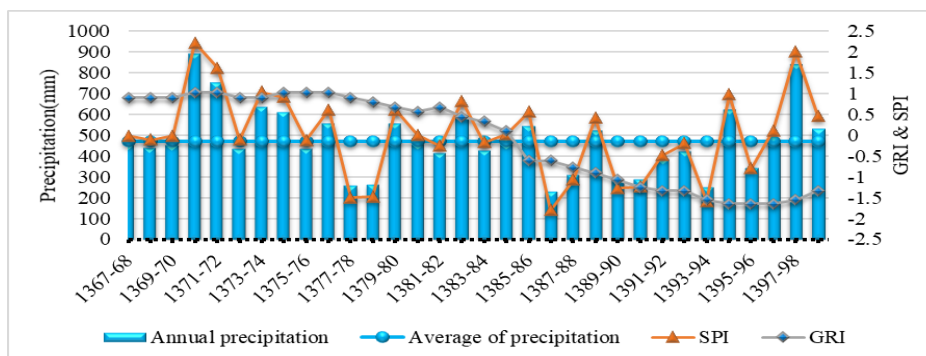


شکل ۲- نمودار معرف آبخوان کوهدشت.
Figure 2- Representative graph of Kohdasht Aquifer.

تعیین وضعیت خشک‌سالی هواشناسی و آب زیرزمینی

سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۷۱، ۱۳۷۳ و ۱۳۹۷ نیز به ترتیب معادل (۲/۲)، (۱/۶۱)، (۱/۰۱) و (۱/۹۹) بود. نتایج نشان داد نمره‌های منفی شاخص GRI از سال ۱۳۸۵ شروع شد و تا پایان دوره؛ به این ترتیب: (-۰/۶۲)، (-۱/۲۵)، (-۱/۰۷)، (-۰/۹۱)، (-۰/۷۷)، (-۱/۳۴)، (-۱/۳۴)، (-۱/۶۵)، (-۱/۶۵)، (-۱/۱۵۵)، (-۱/۳۴) و (-۱/۵۵) تداوم یافت که این موضوع نشان‌دهنده خشک‌سالی آب زیرزمینی بود. بررسی‌های انجام‌شده به وسیله واکاوی داده‌ها، روابط بارندگی و شاخص‌های خشک‌سالی با رسم نمودارهای مربوطه تأیید شد؛ به طوری که با کاهش بارندگی روند اندازه‌های SPI و GRI نیز کاهش می‌شد (شکل ۳).

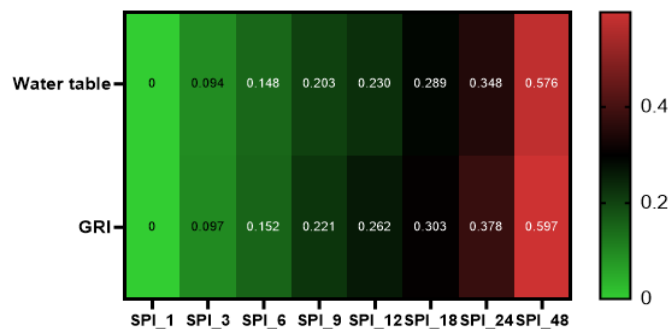
وضعیت رطوبتی دشت کوهدشت در مقیاس سالانه بر اساس شاخص‌های SPI و GRI با استفاده از اندازه‌های بارندگی و تراز سطح ایستابی ماهانه ایستگاه‌های انتخاب‌شده و چاه‌های مشاهده‌ای، در دوره آماری ۱۳۶۷-۱۳۹۹ محاسبه شد. نمره‌های منفی شاخص SPI از ابتدای دوره شروع شد و تا سال ۱۳۹۳ ادامه یافت. اعداد کمتر از منفی یک با وضعیت خشک مربوط به سال‌های ۱۳۷۷، ۱۳۷۸، ۱۳۸۶، ۱۳۸۷، ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۳ به ترتیب معادل (۱/۵-)، (۱/۴۸-)، (۱/۸۱-)، (۱/۰۷-)، (۱/۲۷-)، (۱/۲۴-) و (۱/۵۹-) بودند. شاخص خشک‌سالی هواشناسی در دامنه وضعیت بسیار مرطوب و مرطوب مربوط به



شکل ۳- مقایسه بارش سالانه با وضعیت رطوبتی سالانه دشت کوهدشت بر اساس شاخص‌های SPI و GRI.
Figure 3- Comparison of annual Precipitation and the annual moisture status of Kohdasht Plain based on SPI and GRI indices.

سطح آب زیرزمینی و شاخص GRI افزایش یافت. بیشترین ضریب همبستگی ماهانه میان شاخص SPI و فراسنجه های کمی آب زیرزمینی دشت کوهدشت، در مقیاس ۴۸ ماهه بود و در سطح ۰/۱۰٪ (احتمال ۰/۹۹٪) معنی دار شد. ضریب همبستگی شاخص SPI در مقیاس ۴۸ ماهه با میانگین سطح ایستابی ۰/۵۷۶ و با شاخص GRI برابر ۰/۵۹۷ بود (شکل ۴).

بررسی شدت اثر بارندگی بر تغییرات کمی منابع آب زیرزمینی پس از محاسبه شاخص های GRI و SPI اندازه های ضریب های همبستگی میان شاخص SPI در مقیاس های زمانی گوناگون ماهانه با میانگین تراز سطح ایستابی و شاخص GRI در ماه متناظر، محاسبه شد. بررسی ها نشان داد که با افزایش مقیاس زمانی SPI، ضریب همبستگی آن با میانگین بلندی

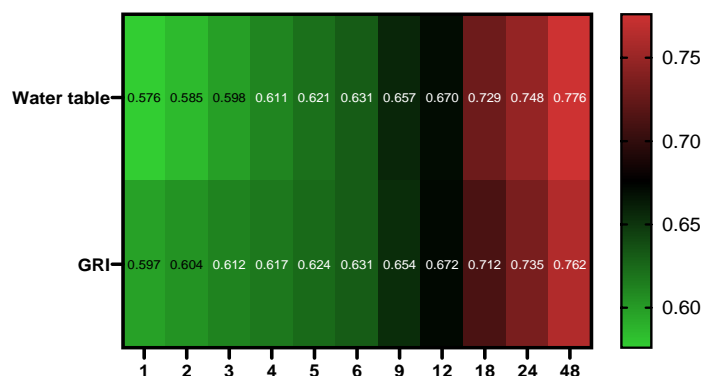


شکل ۴- نقشه حرارتی ضریب های همبستگی میان شاخص SPI ماهانه با میانگین تراز سطح ایستابی و شاخص GRI دشت کوهدشت در دوره آماری ۱۳۹۹-۱۳۶۷.

Figure 4- Heat map of the correlation coefficients between the monthly SPI index with the average water table and the Kohdasht GRI index during the statistical period of 1987-2019.

بود. همچنین، بیشترین همبستگی برابر ۰/۷۶۲ میان شاخص SPI در مقیاس ۴۸ ماهه و شاخص GRI با اعمال تأخیر زمانی ۴۸ ماهه بود. ضریب همبستگی میان SPI_۴۸ و میانگین تراز سطح ایستابی بدون اعمال تأخیر زمانی برابر ۰/۵۷۶ بود و ضریب همبستگی میان SPI_۴۸ و GRI برابر ۰/۵۹۷ بود که در سطح ۰/۰۱ معنی دار شد (شکل ۵).

تأثیر تأخیر زمانی ماهانه خشک سالی هواشناسی بر میانگین تراز سطح ایستابی و شاخص GRI با تأخیرهای زمانی یک، دو، سه، چهار، پنج، شش، نه، دوازده، هجده، بیست و چهار و چهل و هشت ماهه بررسی شد. نتایج نشان داد که بیشترین همبستگی ۰/۷۷۶ میان شاخص SPI در مقیاس ۴۸ ماهه و میانگین سطح ایستابی با اعمال تأخیر زمانی ۴۸ ماهه



شکل ۵- نقشه حرارتی ضریب‌های همبستگی شاخص SPI در مقیاس ۱۸ و ۲۴ ماهه با میانگین تراز سطح ایستابی و شاخص GRI دشت کوه‌دشت با اعمال تأخیر زمانی در دوره آماری ۱۳۶۷-۱۳۹۹.

Figure 5- Heat map of correlation coefficients of SPI index in 18 and 24 months scale with the average water table and GRI index of Kohdasht plain by applying delay time during the statistical period of 1987-2019.

$$D_{ym}=1167+4.73 \text{ SPI}_{48}, D_y \quad (9)$$

D_{ym} : اندازه‌های بلندی سطح آب زیرزمینی (متر) در سال y و ماه m , SPI_{48} : شاخص بارندگی معیار شده در مقیاس ۴۸ ماهه بدون تأخیر زمانی است.

بر اساس نتایج به‌دست آمده، در دوره آماری ۱۳۹۹-۱۳۶۷ رابطه میان میانگین تراز سطح ایستابی به‌عنوان متغیر وابسته و SPI_{48} به‌عنوان متغیر مستقل، از نوع وایزی خطی ساده و معنی‌دار در سطح ۰/۰۱ بود (جدول ۲). معادله وایزی خطی میان این دو متغیر در آبخوان دشت کوه‌دشت به‌شکل رابطه ۹ بود.

جدول ۲- نتایج وایزی خطی میان میانگین تراز سطح ایستابی و SPI_{48} آبخوان کوه‌دشت در دوره آماری ۱۳۶۷-۱۳۹۹.
Table 2- The results of linear regression between the average water table and SPI_{48} Kohdasht during the statistical period of 1987-2019.

Coefficients	P Value	R (adj)	R ²	dependent variable	Independent variable	
Constant	1167	0.0	33	33.1	Dym	SPI_{18}
SPI_{18}	4.73					

آبخوان ۴/۹۵- میلیون مترمکعب محاسبه شد (شرکت مهندسی مشاور سنگاب زاگرس ۲۰۱۲). جریان زیرزمینی ورودی عمدتاً از سمت بلندی‌ها و دشت‌های مجاور وارد آبخوان می‌شد و جریان‌های خروجی به سمت پایین دست منتقل می‌شدند (جدول ۳). جریان زیرزمینی ورودی به این آبخوان ۸/۱۶ میلیون مترمکعب بود که از سمت بلندی‌ها و دشت بالادست آبخوان، وارد آبخوان می‌شد. اندازه نفوذ مستقیم از بارندگی بر سطح دشت ۲/۸۶ میلیون مترمکعب در آبخوان به‌دست آمد. اندازه نفوذ از جریان‌های سطحی

بر اساس ضریب تبیین محاسبه‌شده، ۳۳/۱٪ از پراکنش میانگین تراز سطح ایستابی تحت تأثیر ۴۸ SPI_{48} بود و ۶۶/۹٪ تحت تأثیر دیگر عامل‌ها بود (چمن‌پیرا ۲۰۲۲).

تعیین وضعیت بهره‌برداری با بررسی بیلان آب زیرزمینی

با استناد به گزارش توجیهی تخصیص منابع آب منطقه مطالعه‌شده کوه‌دشت اندازه ضریب ذخیره آبخوان ۴٪ بود. با در نظر گرفتن مساحت آبخوان آبرفتی، حجم تغییرات ذخیره سالانه (کاهش آب) در

مساحت دشت (۲۴۸/۸ کیلومتر مربع) و آبخوان (۱۸۲/۱ کیلومتر مربع) و با توجه به توزیع بارندگی در سطح دشت، اندازه نفوذ از بارندگی در آبخوان کوهدشت ۲/۸۶ میلیون مترمکعب محاسبه شد. مناسب ترین روش محاسبه اندازه تغذیه آبخوان به وسیله رود و یا اندازه زهکشی آبخوان به وسیله رودها، اندازه گیری همزمان آب رود در چندین مقطع از طول مسیر آن است. اندازه کاهش آب در مسیر رود، معادل تغذیه آبخوان (با توجه به اندازه برداشت از آب رود) به وسیله رود بود و افزایش آب، مربوط به زهکشی آبخوان به وسیله رود بود، که عملاً این اندازه گیری ها در این پژوهش امکان پذیر نبود. از این رو، با توجه به اینکه داده هایی از ضریب نفوذ پذیری بستر و دیواره رودها (K) در دست نبود، استفاده از فرمول های تجربی نیز امکان پذیر نبود. بنابراین رقم های مربوط به زهکشی و یا تغذیه آبخوان با آزمون و خطا و مهار با توجه به خطوط تراز آب زیرزمینی و شکل خطوط در مجاورت رود، شرایط منطقه و بازدید های میدانی و نیز تجارب کارشناسی تعیین شد (شرکت مهندسی مشاور سنگاب زاگرس ۲۰۱۲). از این رو، می توان گفت اندازه ۱/۸۱ میلیون مترمکعب (حدود ۰.۲٪) از جریانات سطحی تولید شده در مناطق مشرف به آبخوان در سطح آبخوان نفوذ یافته است.

۱/۸۱ میلیون مترمکعب برآورد شد. اندازه نفوذ آب برگشتی از آبیاری و آب شرب و صنعت به ترتیب، ۶/۶۷ و ۲/۹۶ میلیون مترمکعب بود. اندازه آب تخلیه شده به وسیله منابع آب زیرزمینی ۲۷/۴۱ میلیون مترمکعب بود. حجم آب تبخیر شده از آبخوان با توجه به ژرفای بیش از ۵ متر سطح آب زیرزمینی به صفر بود. برای برآورد حجم ورودی آب زیرزمینی به آبخوان، طول مقاطع ورودی از روی نقشه تراز اندازه گیری شد و اندازه میانگین شیب آبی نیز برای هر مقطع با توجه به نسبت تغییرات بلندی سطح آب به مسافت برآورد شد. اندازه ضریب میانگین قابلیت انتقال نیز با استفاده از نقشه قابلیت انتقال آبخوان محاسبه شد. بر اساس نتایج به دست آمده **Error! Reference source not found.** اندازه حجم ورودی از مقطع شمالی ۵/۵ و مقطع جنوب شرقی ۶۶/۲ میلیون مترمکعب برآورد شد. با توجه به منحنی های تراز در ماه های تر و خشک، جهت جریان آب زیرزمینی از اطراف آبخوان به سمت مرکز بود و به این ترتیب خروجی آب زیرزمینی از آبخوان صفر شد. یکی از مؤلفه های بیلان آبخوان، اندازه نفوذ از بارندگی به آبخوان بود. در این پژوهش حجم نفوذ از بارش در دشت با کم کردن حجم تبخیر و رواناب از بارش کل به دست آمد. با توجه به حجم نفوذ از بارش در دشت (۳/۹۱ میلیون مترمکعب) و با وجود رابطه میان

جدول ۳- بیلان عمومی منطقه مطالعه شده کوهدشت (شرکت مهندسی مشاور سنگاب زاگرس ۲۰۱۲).

Table 3- The general water balance of Kohdasht study area (Sangab Zagros Consulting Engineers 2012).

ΔS		Output flows							Input Flows				
Groundwater	Surface	Total	Groundwater	Surface water	Evapotranspiration			Total	Precipitation				
					net used	Groundwater	Free surface		Precipitation	Groundwater	Surface	Moutain	Plain
-4.95	0	528	0	48.63	39.54	0	0	439.83	523.05	0	0	386.09	136.96

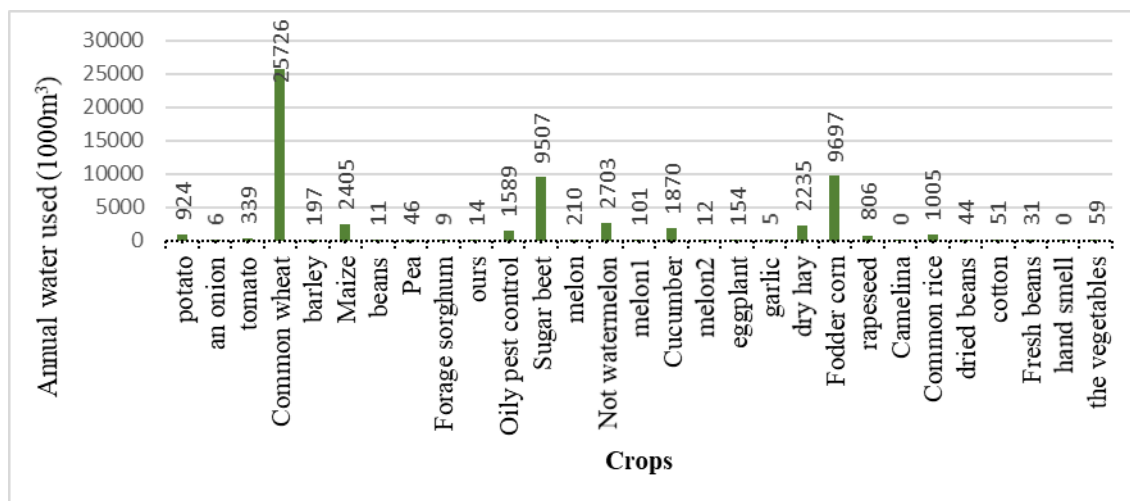
جدول ۴- وضعیت بیلان آب زیرزمینی منطقه مطالعه‌شده کوه‌دشت (شرکت مهندسی مشاور سنگاب زاگرس ۲۰۱۲).

Table 4- The groundwater balance of Kohdasht study area (Sangab Zagros Consulting Engineers 2012).

$\Delta S(\text{mm}^3)$	Discharge(mm^3)					Recharge (mm^3)							Area (km^2)
	Total	Groundwater discharge	Aquifer evaporation	drainage	spring and Well Qanat	total	Wastewater infiltration	agricultural wastewater Infiltration	Surface flow infiltration	Precipitation infiltration	Groundwater recharge		
-4.95	27.41	0	0	0	27.41	22.46	2.96	6.67	1.81	2.86	8.16	182.1	

گوناگون از سازمان جهاد کشاورزی استان لرستان دریافت شد (آمار منتشر نشده). با استفاده از اندازه آب لازم سالانه در هکتار و سطح زیر کشت هریک از محصولات، میانگین سطح زیر کشت و آب لازم سالانه برای آن‌ها به‌طور جداگانه محاسبه شد. جمع کل آب لازم سالانه برای تولید محصولات زراعی ۷۸۶۲۶/۸۹ هزار مترمکعب و کل آب مصرفی ۵۹۷۵۶ هزار مترمکعب برآورد شد. در میان این محصولات بیشترین اندازه مصرف آب کشاورزی مربوط به گندم، ذرت علوفه‌ای و چغندر قند به‌ترتیب با مصرف سالانه آب ۳۳۸۵۱، ۱۲۷۵۹ و ۱۲۵۰۹ هزار مترمکعب بود (شکل ۶).

تعیین نوع محصولات زراعی و حجم آب لازم برای هر یک از محصولات در منطقه مطالعه‌شده کوه‌دشت ۳۵ نوع محصول زراعی در پنج گروه غلات، حبوبات، سیفی‌جات، گیاهان علوفه‌ای و دانه‌های روغنی کشت می‌شد. میانگین نیاز آبی سطح زیر کشت غلات بیش از ۱۰ هزار مترمکعب در هکتار در سال است. از میان غلات کشت شده، گندم با میانگین نیاز آبی سالانه ۶ هزار مترمکعب در هکتار در سال در مقایسه با دیگر محصولات کشاورزی آبی بیشتر کشت می‌شد. پس از تعیین نوع محصولات زراعی که در سال‌های گذشته به‌وسیله کشاورزان منطقه کشت شده است، اطلاعات سطوح زیر کشت این محصولات در سال‌های



شکل ۶- حجم سالانه مصرف آب کشاورزی در منطقه مطالعه‌شده کوه‌دشت.

Figure 6- The annual volume of agricultural water used in the study area of Kohdasht.

به‌عنوان متغیر وابسته و اندازه مصرف آب به‌عنوان متغیر مستقل، وایزی خطی ساده بود. به‌طوری‌که، این

با توجه به نتایج به‌دست آمده، در دوره آماری مطالعه‌شده رابطه میان میانگین تراز سطح ایستابی

با توجه به ضریب تبیین محاسبه شده، ۶۶/۷٪ از پراکنش میانگین تراز سطح ایستابی تحت تأثیر اندازه مصرف آب کشاورزی و ۳۳/۳٪ تحت تأثیر خشک سالی، شرب و صنعت بود.

رابطه در سطح ۰/۰۵ معنی دار شد (جدول ۵). معادله وایازی خطی میان این دو متغیر در آبخوان دشت کوهدشت به شکل رابطه ۱۰ بود.

$$W_t = 1148.3 + 0.0001C_y \quad (10)$$

W_t: اندازه های بلندی مطلق میانگین سطح آب زیرزمینی (متر) در سال y و C_y: اندازه مصرف آب سالانه است.

جدول ۵- نتایج وایازی خطی میان میانگین تراز سطح ایستابی و اندازه مصرف آب آبخوان کوهدشت در دوره آماری.

Table 5- The results of linear regression between the average water level and water used of Kohdasht Aquifer during the statistical period.

Coefficients	P.Value	R (adj)	R ²	dependent variable	Independent variable	
Constant	1148.2	0.05	58.4	66.7	C _{y,m}	W _t
W _t	0.0001					

بود. بیشترین درصد میانگین سالانه مصرف آب کشاورزی ۲۹۳۶۸ هزار مترمکعب در سال مربوط به گروه غلات به ویژه گندم بود. حجم کل آب مصرفی در بخش کشاورزی ۴۱/۹ میلیون مترمکعب در سال بود که با بیلان آب منطقه تناسب نداشت (جدول ۶). اندازه کاهش آب با توجه به بیلان محاسبه شده ۷/۳۱ میلیون مترمکعب برآورد شد (جدول ۷). گروه غلات شامل گندم، ذرت علوفه ای، ذرت دانه ای، شلتوک و جو به ترتیب با ۳۳۸۵۱، ۱۲۷۵۹، ۳۱۶۵، ۱۳۲۲ و ۲۶۰ هزار مترمکعب به ترتیب بیشترین تا کمترین اندازه سالانه مصرف آب کشاورزی را کسب کردند.

حجم آب برداشت شده برای شرب و صنعت ۴/۳۵ میلیون مترمکعب بود. ضریب نفوذ از پساب شرب و صنعت ۶۸٪ بود. از این رو، اندازه کل آب مصرفی در این بخش ۱/۳۹ میلیون مترمکعب برآورد شد و اندازه نفوذ از پساب شرب و صنعت به آبخوان ۲/۲۹۶ میلیون مترمکعب در سال برآورد شد.

مقایسه تأثیر خشک سالی هواشناسی و عامل های انسانی بر افت سطح آب زیرزمینی آبخوان کوهدشت با استفاده از اطلاعات آماری به دست آمده و رسم نقشه های حرارتی

کمترین درصد میانگین سالانه مصرف آب کشاورزی ۴۷ هزار مترمکعب در سال مربوط به گروه حبوبات

جدول ۶- اندازه میانگین مصرف آب در گروه های گوناگون زراعت آبی (برحسب هزار مترمکعب).

Table 6- The average amount of water used in different groups of irrigated (1000m³).

E	D	C	B	A	Groups	Row/column
Average area percentage	Average percentage of water used	Average annual requirement per hectare	Average annual water used	Average cultivated area		
0.21	0.26	9.6	3.92	47	Legumes	1
6.78	7.27	6.6	127.98	1683.4	Oilseeds	2
6.78	11.13	11	127.98	7874.25	summer crops	3
6.51	10.22	13	122.91	2930.71	Fodder	4
79.73	71.11	10	1505.77	29368	cereal	5
			41903.36	1888.56	Total	

جدول ۷- بیلان آب منطقه مطالعه‌شده کوهدشت با استفاده از آمار مصرف آب کشاورزی (میلیون مترمکعب).

Table 7- Water balance of Kohdasht study area using agricultural water used statistics.

ΔS	Output Flows						Input flows				
	total	Evapotranspiration					total	Precipitation			
		Average net used in agriculture	Surface water	Groundwater	Free surface	Precipitation		Groundwater	Surface water	Mountain	Plain
-7.31	530.36	41.9	48.63	0	0	439.83	523.05	0	0	386.09	136.96

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

میانگین بلندی سطح آب زیرزمینی و شاخص GRI افزایش یافت. بیشترین ضریب همبستگی ماهانه میان شاخص SPI و فراسنجه‌های کمی آب زیرزمینی دشت کوهدشت، در مقیاس ۴۸ ماهه در سطح ۰/۰۱ و احتمال ۹۹٪ معنی‌دار شد. بیشترین همبستگی میان شاخص SPI در مقیاس ۴۸ ماهه و میانگین سطح ایستابی با اعمال تأخیر زمانی ۴۸ ماهه بود. همچنین، بیشترین همبستگی (۰/۷۶۲) میان شاخص SPI در مقیاس ۴۸ ماهه و شاخص GRI با اعمال تأخیر زمانی ۴۸ ماهه بود. ضریب همبستگی میان SPI_۴۸ و میانگین تراز سطح ایستابی بدون اعمال تأخیر زمانی ۰/۵۷۶ بود و ضریب همبستگی میان SPI_۴۸ و GRI ۰/۵۹۷ بود که در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار شد. این یافته‌ها با نتایج بررسی‌های ناصرزاده و احمدی (۲۰۱۲) و محمدی قلعه‌نی و ابراهیمی (۲۰۱۱) همخوانی دارد. رابطه وایازی خطی ساده میان میانگین تراز سطح ایستابی به‌عنوان متغیر وابسته و SPI_۴۸ به‌عنوان متغیر مستقل در دوره آماری ۱۳۹۹-۱۳۶۷ ضریب تبیین ۳۳/۱٪ را نشان داد. از این‌رو، ۳۳/۱٪ از پراکنش میانگین تراز سطح ایستابی تحت تأثیر SPI_۴۸ و ۶۶/۹٪ تحت تأثیر عامل‌های انسانی بود.

بررسی بیلان آب زیرزمینی نشان داد، اندازه تغذیه ۲۷/۴۶ و اندازه تخلیه از آبخوان کوهدشت ۴۱/۲۷ میلیون مترمکعب بود و ۴/۹۵ میلیون مترمکعب نیز

نتایج این پژوهش نشان داد روند تغییرات شیب سطح آب زیرزمینی آبخوان کوهدشت در دوره آماری ۳۲ ساله منفی است؛ تراز آبخوان با ۱۹/۵۵ متر افت، سالانه به‌طور میانگین ۶۱ سانتی‌متر کاهش یافته است. خشک‌سالی هواشناسی در سال‌های ۱۳۷۷، ۱۳۷۸، ۱۳۸۶، ۱۳۸۷، ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۳ رخ داده است. رخدادهای ترسالی مربوط به سال‌های ۱۳۷۰، ۱۳۷۱، ۱۳۷۳ و ۱۳۹۸ بود و در باقی سال‌ها شرایط عادی بود. بررسی‌ها نشان داد که رخداد خشک‌سالی آب زیرزمینی با دو سال تأخیر پس از خشک‌سالی هواشناسی رخ داد که به‌دلیل کاهش محسوس بارندگی و تغییر الگوی کشت منطقه بود. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های محمدی و شمسی‌پور (۲۰۰۲)، یاسمنی و همکاران (۲۰۱۲) و چمن‌پیرا و همکاران (۲۰۱۵) همخوانی دارد. توسعه کشت ذرت در دهه ۱۳۸۰ و تخلیه بی‌رویه آب زیرزمینی از دلایل اصلی خشک‌سالی آبخوان دشت کوهدشت در ۱۰ ساله سوم به‌شمار می‌آید. بیشترین درصد رطوبت بارندگی و تراز آبخوان به‌ترتیب با ۸۱ و ۶۹٪ مربوط به وضعیت عادی و به‌ترتیب منطبق بر ماه مهر و اسفند بود. اندازه‌های ضریب‌های همبستگی میان شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی ماهانه گوناگون با میانگین بلندی سطح آب زیرزمینی و شاخص GRI در ماه متناظر، در دوره آماری در آبخوان دشت کوهدشت نشان داد، با افزایش مقیاس زمانی SPI، ضریب همبستگی آن با

نفوذ بارندگی در سطح، جریان ورودی زیرزمینی، نفوذ از جریان‌های سطحی، نفوذ پساب کشاورزی و نفوذ از فاضلاب شهری و صنعتی ۲۲/۴۶ میلیون مترمکعب بود. حجم آب مصرفی در بخش کشاورزی، شرب و صنعت ۶۱/۰۹ میلیون مترمکعب بود. از این‌رو، ۳۸/۳۶ میلیون مترمکعب کاهش آب و اضافه برداشت از آبخوان انجام‌شده است. از این اندازه ۱۱/۸۶ میلیون مترمکعب مربوط به خشک‌سالی و ۲۶/۴۷ میلیون مترمکعب مربوط به عامل‌های انسانی شامل اضافه برداشت برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعت بود. از این‌رو، ۳۱/۰۲٪ کاهش آب مربوط به رخداد خشک‌سالی‌ها و ۶۸/۹۸٪ مربوط به عامل‌های انسانی شامل کشاورزی، شرب و صنعت بود.

تأثیر شدت و تداوم خشک‌سالی هواشناسی بر نوسانات سفره آب زیرزمینی، کمتر از برداشت و مصارف آب زیرزمینی منطقه بود. از این‌رو، بیلان منفی فقط نتیجه تأثیر خشک‌سالی‌های هواشناسی بر آبخوان نبود بلکه نوع مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، به‌ویژه در بخش کشاورزی عامل اصلی افت سطح آب زیرزمینی و کاهش آبگیر بود. با توجه به تأخیر زمانی میان رخداد خشک‌سالی‌های هواشناسی و خشک‌سالی آب زیرزمینی فرصت مناسبی برای مدیریت و جلوگیری از افت سطح آب زیرزمینی ایجاد خواهد کرد. از این‌رو، تغییر در مدیریت مصرف آب زیرزمینی به‌وسیله تغییر الگوی کشت افزون بر کاهش اثرات منفی خشک‌سالی باعث می‌شود تا در بلندمدت کاهش آب آبگیر برطرف شود و سرانجام، بیلان آب زیرزمینی افزایش یابد. پیشنهاد می‌شود با برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت و از سوی دیگر با اصلاح الگوی مصرف آب به‌ویژه در بخش کشاورزی گام‌های مؤثری برداشته شود و متناسب با اندازه آب تجدیدپذیر سالانه که از پژوهش‌های بیلان به‌دست می‌آید، برای مصارف گوناگون برنامه‌ریزی و اقدام شود.

کاهش آب وجود داشت. آب از آبخوان به‌وسیله چاه، چشمه و قنات بهره‌برداری شده و معمولاً صرف کشاورزی، شرب و صنعت می‌شده است. با توجه به میانگین مساحت ۹۸۴۵ هکتاری زمین‌های آبی منطقه، بیشترین اندازه آب لازم از آبخوان با ۷۸/۶ میلیون مترمکعب مربوط به بخش کشاورزی بود. نفوذ از پساب شرب که ساختار دفع فاضلاب آن که به‌وسیله چاه‌های جذبی بود، عموماً حدود ۶۰ تا ۸۰٪ در نظر گرفته شد. نوع صنعت و اندازه آب‌بری آن و نحوه دفع پساب در صنایع نیز، اندازه نفوذ را تعیین کرد. اندازه نفوذ از پساب صنایع به شرط استفاده از چاه‌های جذبی، عموماً حدود ۶۰ تا ۸۰٪ در نظر گرفته شد. با توجه به نحوه دفع پساب، ضریب نفوذ از آب شرب و صنعت در کل منطقه مطالعه‌شده بر اساس گزارش‌های شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان ۶۸٪ در نظر گرفته شد. کل اندازه آب برداشت‌شده از آبخوان برای کشاورزی ۷۸/۶ میلیون مترمکعب بود. ضریب نفوذ از پساب کشاورزی ۲۴٪ بود. از این‌رو، اندازه کل آب مصرفی در این بخش ۵۹/۷ میلیون مترمکعب برآورد شد. اندازه نفوذ از پساب کشاورزی به آبخوان ۱۸/۹ میلیون مترمکعب بود. حجم آب برداشت‌شده برای شرب و صنعت ۴/۳۵ میلیون مترمکعب بود. ضریب نفوذ از پساب شرب و صنعت ۶۸٪ بود. از این‌رو، اندازه کل آب مصرفی در این بخش ۱/۳۹ میلیون مترمکعب برآورد شد و اندازه نفوذ از پساب شرب و صنعت به آبخوان ۲/۹۶ میلیون مترمکعب در سال برآورد شد. در مجموع حجم آب سالانه مصرفی از آبخوان ۶۱/۰۹ میلیون مترمکعب بود که از این اندازه ۹۷/۷٪ در بخش کشاورزی و ۲/۳٪ در بخش‌های شرب و صنعت مصرف‌شده است.

آبخوان منطقه مطالعه‌شده تأمین‌کننده اصلی آب در بخش‌های گوناگون کشاورزی شرب و صنعت است. برداشت بی‌رویه در اثر تخلیه آب زیرزمینی مشکلات پرشماری از جمله تنش خشکی در بخش کشاورزی را ایجاد کرده است. حجم آب ورودی به آبخوان ناشی از

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش، از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

رضا چمن‌پیرا: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله. مهران زند: راهنمایی و کنترل نتایج.

ابراهیم کریمی سنگچینی: مشاوره و تحلیل‌های آماری.

الهام داودی: مفهوم‌سازی، ویرایش و بازبینی متن مقاله

فهرست منابع

- Abbasinia A, Morshedi M, Zohorian m, Ghorbanian j. 2021. Analysis and comparison of SPI and GRI indicators in the evaluation of meteorological drought and underground water. Case study: Mehran lain, Ilam Province. Quarterly Journal of Natural Geography. 13 (51): 95- 114 (In Persian).
- Asadzadeh F, Kaki M, Shakiba S, Raei B. 2016. Impact of drought on groundwater quality and groundwater level in qorveh-chardoli Plain. Iran-Water Resources Research. 12 (3 IR-WRR): 153-165. (In Persian).
- Bayat-Varkeshi M, Farahani M, Ghabaei Sough M. 2018. Effect of meteorological drought on groundwater resource (Case stusy: Komijan Aquefer in Markazi Province). Iran-Water Resources Research. 14 (1 IR-WRR): 114-124. (In Persian).
- Behzadi F, Javadi S, Moridi A. 2022. Assessing drought using SPI and GRI indices and investigating the drop in groundwater levels using Geographical Information System (GIS). 2nd National Conference on Deficit Irrigation and the Use of Non-Conventional Water for Agriculture in Dry Regions Fasa. 11 p. (In Persian).
- Chamanpira R. 2022. Evaluation of the effect of meteorological drought on groundwater of Koohdasht Aquifer in Lorestan Province. Iran-Water Resources Research. 18(1 IR-WRR): 166-179. (In Persian).
- Chamanpira, Zehtabian Gh, Ahmadi H, Malekian A. 201۴. Effect of drought on groundwater resources in order to optimize utilization management, case study: Plain Alashtar. Watershed Engineering and Management. 6 (1): 10-20. (In Persian).
- Chamanpira R, Zehtabian Gh, Ahmadi H, Malekian A. 2015. Optimal management pattern for water resources utilization. Case study: Alashtar Plain. Watershed Engineering and Management. 7 (3): 274-285. (In Persian).
- Ebrahimi A, Mohamadi F, Kave N, Malekmohamadi M. 2009. Analysis and evaluation of the effect of drought on the reduction of the water level of wetlands in Chaharmahal and Bakhtiari Province using GIS and RS techniques. Fifth National Conference on Watershed Management Science and Engineering of Iran Gorgan. 14 p. (In Persian).
- Fatehi Marj A, Taie Semiromi M, Kolahchi A, Mirnia Kh. 2011. Forecasting of water table fluctuations using MODFLOW numerical model from 1387 to 1437 in Garbaygan Aquifer. Journal of Irrigation Sciences and Engineering. 34(2): 41-50. (In Persian). DOR: 20.1001.1.25885952.1390.34.2.5.4
- Faryabi M, Mozafarizade J. 2017. The impact of drought on the quantity and quality of groundwater resources in Bushan Plain. 14th National Conference on Irrigation and Evaporation Reduction papers Kerman. 8 p. (In Persian).
- Habibabadi Gazor N, Derakhshan1 H. 2023. Groundwater -drought conjunctive management: A review of California Experiences. Water and Sustainable Development. 10(1): 77-86. (In Persian). DOI: 10.22067/JWSD.V10I1.2302-1219
- Khan S, Gabrie H, Rana T. 2008. Standard precipitation index to track drought and assess impact of Precipitation on water tables in irrigation areas. Irrigation Drainage System. 22: 159-177. DOI: 10.1007/s10795-008-9049-3
- Mohamadi H, Shamsipor A. 2002. The impact of recent droughts on the decline of groundwater resources in the plains of North Hamadan. Geography Research. 45(35): 115-130. (In Persian).
- Mosaedi A, Marashi M, Kavakebi Gh. 2009. Comparative study of drought in rainy and low

- rain regions (Case study: Golestan Province). *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*. 16(1): 277-290. (In Persian).
- Mirakbari M, Mortezaei G, Mohseni M. 2018. Investigation of effect meteorological drought on surface and ground water resources by indices SPI, SPEI, SDI and GRI. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*. 12(42): 70-80. (In Persian).
- Mckee TB, Doesken NJ, Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. 8th Conference of Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim. pp.179-184.
- Medicino G, Senatore A, Versace P. 2008. A groundwater resource index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Journal of Hydrology*. 357(3-4): 282-302. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.05.005
- Mohammadi-Ghaleni M, Ebrahimi K. 2011. Assessing impact of irrigation and drainage network on surface and groundwater resources: case study: Saveh Plain, Iran. 21st International Congress on Irrigation and Drainage. pp.15-23.
- Morid S, Moghadasi M, Arshad S, Omid M. 1996. Drought indices package. Water Resources Management Co. (WRMSC), Ministry of Energy, Tehran, Iran.
- Naserzadeh M, Ahmadi E. 2012. Meteorological drought indices in assessing the performance of the drought and its zoning in Qazvin. *Applied Research of GIS (Geographical Sciences)*. 12(27): 141-162
- Nico W, Van Lanen AJ, Loon AF. 2010. Indicators for drought characterization on a global scale. Wageningen, Netherlands, Water and Global Change, (Technical Report No. 24). 93 p.
- Porhemat J, razi T, Rahimibandarabadi S. 2015. Investigation on spatio-temporal variability of meteorological drought in southwestern Iran (Case study in Karkheh Basin). *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 5 (3): 60-79. (In Persian).
- Porhemmat MS, Porhemmat J, Mirzaee M. 2021. Investigation on drought impact on the depletion of spring discharge in western parts of Iran. *Watershed Engineering and Management*. 12(4): 1040-1054. (In Persian). Doi.org/10.22092/ijwmse.2019.127081.1689
- Samin M, Tabatabaei M, Soltani J. 2012. The position of management and sustainable development of water resources during drought. The first national conference on sustainable development in arid and semiarid regions Islamic Azad University Abarkoh Branch. 8 p. (In Persian).
- Sangab Zagros Consulting Engineers. 2012. Studies on the preparation of a balance and justification report for the allocation of study areas in Lorestan Province. Khorramabad: Regional Water Company of Lorestan. 85 p. (In Persian).
- Seif M, Mohamadzade H, Mosaedi A, Sayad H. 2012. Assessing the effect of drought on the groundwater resources of the Fasa Plain Aquifer using standardized Precipitation indicators, groundwater resources and standardized electrical conductivity. *Water Resources Engineering*. 5 (13): 57-74. (In Persian). DOI: 0.1001.1.20086377.1391.5.13.4.7
- Simaei A, Kheshtkari S. 2012. Investigating the environmental aspects of the drought and dust with a perspective on West Azarbaijan province. 2nd National Seminar on Biological Diversity and Its Impact on Agriculture and the Environment, Orumieh. 10 p. (In Persian).
- Shakiba A, Mirbagheri B, Kheiri A. 2010. Drought and its effect on groundwater resources in the east of Kermanshah province using SPI index. *Geography (Scientific Quarterly of the Iranian Geographical Society)*. 8 (25): 104-124. (In Persian).
- Taghipoor-Javi A, Faramarz B. 2023. Assessing the Groundwater Governance in Critical Forbidden Plains of Chaharmahal and Bakhtiari Province (Emphasizing the effectiveness principle of OECD). *Iran Water Resources Research*. 19 (3): (IR-WRR): 57-78. (In Persian). DOI: 20.1001.1.17352347.1402.19.3.4.3
- Tood DK. 1980. *Groundwater hydrology*. California Berkeley. 652 p.
- Yasamani S, Mohamadzade H, Mosaedi A. 2012. Investigating the effect of drought on changes in the groundwater level of Torbat Jam-Fariman plain by using SPI and GRI indices. 16th Symposium of Geological Society of Iran Shiraz. 12 p. (In Persian)



Determination the Quantitative Impact of Drought and Human Factors on Groundwater Level Decline in the Kohdasht Aquifer, Lorestan Province

Reza Chamanpira^{*1}, Mehran Zand², Ebrahim Karimi Sangchini³, Elham Davoodi⁴

1 and 3- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Khorramabad, Iran

2- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran

4- Researcher, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, (AREEO), Khorramabad, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

In Lorestan Province, due to the severe decline in the groundwater level of the Kohdasht Aquifer it falls under the category of prohibited water extraction areas. The aim of this research was explaining and describing the causes of the decline in the groundwater level of the Kohdasht Aquifer. Also, the contribution of natural factors and the relationship between the occurrence and time delay of meteorological and geohydrological droughts were investigated.

Materials and Methods

In order to determine the annual moisture situation of the region standardized precipitation indices (SPI) and groundwater index (GRI) were calculated. The correlation coefficients between the SPI at annual, seasonal 3, 6, 9, 12, 18, 24 and 48-month time scales with the mean height of the groundwater level and the GRI in the corresponding month were calculated. Then, the groundwater balance was examined, and the types of agricultural products in the region were determined. Finally, the correlation relationship between the amount of water consumption and the mean height of the groundwater level was determined and the effect of the amount of water drop for each product on the quantitative changes in groundwater resources was examined. On the other hand, the correlation relationship between the amount of water drop for the drinking and industrial sectors and the quantitative changes in groundwater resources was determined and the effect of meteorological drought and human factors on the decline in the groundwater level of the aquifer was determined and examined by drawing heat maps.

Results and discussion

The result showed that 31.02% of the reservoir deficit is related to droughts and 68.98% was related to human factors (agriculture, drinking and industry).

The volume of water entering the aquifer is 22.46 million m³ and the volume of water used in agriculture, drinking and industry is 61.09 million m³.

Article Type: Research Article

***Corresponding Author E-mail:** chamanpira2000@gmail.com

Citation: Chamanpira, R., Zand, M., Karimi sangchini, E., Davoodi, E. 2025. Determination the Quantitative Impact of Drought and Human Factors on Groundwater Level Decline in the Kohdasht Aquifer, Lorestan Province. Watershed Management Research. 38(1): 19-37.

DOI: 10.22092/wmrj.2024.365631.1584

Received: 05 May 2024, **Received in revised form:** 18 June 2024, **Accepted:** 19 September 2024

Published online: 21 March 2025

Watershed Management Research, Vol.38, No.1, Ser. No:146, Spring 2025, pp. 19-37.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



Therefore, the amount of water deficit and over-extraction from the aquifer was 38.36 million m³, of which 11.86 million m³ was related to drought and 26.47 million m³ was related to human factors.

Conclusion and suggestions

Base on the finding of this study, the main cause contributing to the drop on groundwater levels was type of management and exploitation of groundwater resources, particularly in the agricultural sector. Due to the delay time between the occurrences of meteorological and groundwater droughts, there is a good opportunity to manage and prevent the drop of the groundwater level. Therefore, changes in groundwater consumption management by changing the cultivation pattern, in addition to reducing the negative effects of drought, led to the long-term elimination of the water deficit in the reservoir and ultimately an increase in the groundwater balance. It is suggested that the water consumption pattern, especially in the agricultural sector, be improved through short-term, medium-term, and long-term planning, and that planning and action be taken for various uses in proportion to the amount of annual renewable water.

Keywords: GRI Index, Groundwater budget, Kohdasht Aquifer, management, overdraft, SPI Index

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

Reza Chamanpira: conceptualization, performing software/statistical analysis, writing the first version of the article.

Mehran Zand: guidance and control of results.

Ebrahim Karimi Sangchini: consulting and statistical analysis.

Elham Davoodi: Conceptualization, editing and revision of the text of the article



مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سمنان

پژوهش‌های آب‌مخزرداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سمنان

بررسی اثرات خشک‌سالی روی الگوی زمانی تغذیه آبخوان‌ها در آبخیز دامغان رود

مهین خسروی^۱، محمدرضا یزدانی^{۲*}

۱- پژوهشگر پسادکتری، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب کشاورزی و شرب به‌شمار می‌آید و به‌شدت تحت تأثیر عامل‌های محیطی و اقلیمی است. دانش محدود ما از فرآیندهای آب‌شناختی به‌ویژه منابع آب زیرزمینی، شناخت سنج‌ها و الگوهای مؤثر بر تغذیه آب‌های زیرزمینی برای مدیریت بهینه منابع آب ضروری است. بررسی الگوی زمانی تغذیه آب‌های زیرزمینی زمینه‌ای را برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی به‌منظور کاهش اثرات خشک‌سالی روی منابع آب فراهم می‌آورد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش کمی‌سازی تغذیه آب‌های زیرزمینی در دوره زمانی ۲۰۱۸-۲۰۰۸ با استفاده از مدل SWAT در آبخیز دامغان رود در استان سمنان انجام شد. واسنجی و اعتبارسنجی مدل با استفاده از مدل SWATCUP و دستورالعمل SUFI2 انجام شد. از شاخص‌های بارش استاندارد شده (SPI)، شناسایی خشک‌سالی RDI و رواناب استاندارد شده SRI برای بررسی اثرات خشک‌سالی روی تغذیه آبخوان‌ها استفاده شدند. بررسی روند تغذیه آبخوان‌ها با استفاده از آزمون ناپرامتری من-کندال و روش برآوردگر شیب سن محاسبه شد.

نتایج و بحث

بررسی نتایج ضریب نش-ساتکلیف (NSE) در دوره واسنجی (۰/۷۷) و اعتبارسنجی (۰/۶۹) در مدل SWAT نشان داد که کارایی این مدل در شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی نسبتاً خوب بود. یافته‌ها نشان داد، در مقیاس ماهانه اثرات خشک‌سالی بر تغذیه آبخوان روند خاصی نداشت، اما در فصل‌های زمستان، بهار و تابستان روند افت تغذیه آبخوان افزایشی بود. در فصل‌های بارش، کاهش اندازه بارش و رواناب و افزایش اندازه دما و تبخیر تعرق منجر به افزایش خشک‌سالی و افت تغذیه آبخوان‌ها شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m_yazdani@semnan.ac.ir

استناد: خسروی، م.، یزدانی، م.ر. ۱۴۰۴. بررسی اثرات خشک‌سالی روی الگوی زمانی تغذیه آبخوان‌ها در آبخیز دامغان رود. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۸(۱): ۶۰-۳۸.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2024.365662.1585

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۴، دوره ۳۸، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۴۶، بهار ۱۴۰۴، صفحه‌های ۳۸ تا ۶۰.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تجزیه و تحلیل الگوی زمانی آبخوان‌ها نشان داد در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تغییرات متغیرهای اقلیمی ارتباط نزدیکی با یکدیگر و با پدیده خشک‌سالی دارند. نتایج این پژوهش نشان داد الگوی زمانی تغذیه آبخوان‌ها تحت تأثیر تغییرات متغیرهای گوناگون در آبخیز تغییر کرد و اندازه این تغییرات براساس همبستگی متغیرها بود. روندیابی خشک‌سالی‌ها روی تغذیه آبخوان‌ها نشان داد که در دوره ترسالی روند افزایشی و در دوره خشک‌سالی روند کاهشی بود. از این یافته می‌توان برای بهبود تغذیه آبخوان‌ها در ترسالی‌ها و کاهش اثرات خشک‌سالی‌ها روی تغذیه آبخوان‌ها با مدیریت و برنامه‌ریزی بهینه منابع آب موجود استفاده کرد. پیشنهاد می‌شود برای بهبود تغذیه آبخوان‌ها و کاهش اثرات خشک‌سالی، برنامه‌ریزی جامع و مدیریت بهینه منابع آب در دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی انجام شود. همچنین، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و تقویت نظارت و پایش منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ضروری است تا به‌موقع از کاهش غیرمنتظره تغذیه آبخوان‌ها جلوگیری شود.

واژگان کلیدی: آب‌زیرزمینی، آزمون من-کندال، شاخص خشک‌سالی، مدل SWAT

مقدمه

پرشماری تأثیر متغیرهای اقلیمی را بر تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی تأیید می‌کند (بوهای بوکتون و همکاران ۲۰۲۲؛ حشماوی و همکاران ۲۰۲۲؛ منگیستو و همکاران ۲۰۲۲). از این‌رو، برای بهره‌برداری پایدار از منابع آب‌های زیرزمینی، شناسایی عامل‌های اقلیمی مؤثر بر تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی ضروری است. عامل مهم دیگر، شرایط محلی آبخیز است که بر تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی تأثیرگذار است. شاه و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی بازیابی آب‌های زیرزمینی در مناطق نیمه‌خشک هند را با استفاده از حوضچه‌ها و سدهای محلی بررسی کردند. نتایج نشان داد که اقدام‌های محلی باعث افزایش تغذیه آب‌های زیرزمینی شد. شرایط محلی با خصوصیات مانند پستی‌بلندی و کاربری زمین‌ها بر فرایندهای آب‌شناختی آبخیز تأثیرگذارند (هرسی و همکاران ۲۰۲۳؛ نوری و سینگ ۲۰۲۴).

مدل‌های آب‌شناختی مبتنی بر فیزیک آبخیز، ابزارهای قدرتمندی برای برآورد تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی هستند و امکان برآورد اندازه‌های تغذیه آبخوان‌ها را به‌شکل کاربردی فراهم می‌آورند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل آب‌شناختی SWAT اشاره کرد (ساهو و همکاران ۲۰۲۳). این مدل با تقسیم‌بندی آبخیز بر اساس کاربری زمین‌ها، خاک و شیب، واحدهایی

آب‌های زیرزمینی نقش حیاتی در تأمین نیازهای آبی بوم‌نظام‌ها در سراسر جهان دارند و یکی از مهم‌ترین منابع آب برای کشاورزی و شرب به‌شمار می‌آیند. این منابع با ماهیتی پویا به شدت تحت تأثیر عامل‌های محیطی و اقلیمی هستند (بارمن و همکاران ۲۰۲۳). افزایش تقاضا ناشی از رشد سریع جمعیت، صنعتی شدن و توسعه کشاورزی، منجر به برداشت بی‌رویه آب از این منابع شده است و نبودن مدیریت صحیح آن‌ها فشارهای دو‌چندانی را بر منابع آب‌های زیرزمینی وارد کرده است (بوور ۲۰۰۰؛ تولارام و کریشنا ۲۰۰۹؛ وانگ و همکاران ۲۰۱۸؛ جیا و همکاران ۲۰۲۰).

رخداد پدیده‌های حدی اقلیمی مانند خشک‌سالی باعث کاهش تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی شده است و اثرات برداشت از این منابع را تشدید می‌کند (پایوا و همکاران ۲۰۲۰؛ بوسیکو و همکاران ۲۰۲۱). این اثرات به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که تغییرپذیری بارش بیشتری دارند، شدیدتر است. سندستروم (۱۹۹۵) گزارش داد که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کاهش ۱۵٪ سالانه بارش سبب افت ۴۰ تا ۵۰٪ تغذیه سالانه سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود. بررسی بحران آب در منطقه کیپ‌تاون نشان داد کاهش بارش، مدیریت نادرست و مصرف بیش از حد منابع آبی عامل اصلی بحران بود (کیلی و همکاران ۲۰۱۹). پژوهش‌های

محیط‌های آب‌زمین‌شناختی گوناگون تغییر می‌کند و شدت خشک‌سالی‌ها، الگوهای تغذیه آب زیرزمینی را به‌طور قابل توجهی تغییر می‌دهند. وایت و همکاران (۲۰۲۳) پیامدهای تغییرات ناشی از خشک‌سالی بر تغذیه آب زیرزمینی برای امنیت آبی کشاورزی در درهٔ مرکزی کالیفرنیا را با استفاده از مدل‌های آب‌شناختی بررسی کردند و برای شبیه‌سازی فرآیندهای تغذیه از سناریوهای گوناگون خشک‌سالی استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که شدت‌های گوناگون خشک‌سالی باعث شدت کاهش دسترسی به آب زیرزمینی شد. از این‌رو، در مدیریت منابع آب باید تغییرات الگوی تغذیهٔ سفره‌های آب زیرزمینی تحت شرایط گوناگون خشک‌سالی برای استفاده پایدار از آب‌های زیرزمینی مدنظر قرار داد. یکی از بهترین روش‌ها برای روندیابی شاخص‌های اقلیمی و آب‌شناختی، روش برآوردگر سن و آزمون ناپارامتری من-کندال است (عبداللهی ۲۰۱۵). در سال‌های گذشته در آبخیز دامغان‌رود سمنان به‌سبب تداوم خشک‌سالی، حجم بارش و افت تغذیهٔ سفره‌های آب زیرزمینی کاهش قابل توجهی داشته است. از این‌رو، ایجاد درک عمیق‌تری از الگوی زمانی تغذیهٔ سفره‌های آب زیرزمینی و بررسی روند آن با استفاده از مدل آب‌شناختی SWAT و روش‌های آماری پیشرفته تحت اثر خشک‌سالی‌های گوناگون ضروری به‌نظر می‌رسد. در این پژوهش، از مدل آب‌شناختی SWAT به‌دلیل دقت، توانمندی و انعطاف‌پذیری زیاد در شبیه‌سازی فرآیندهای آب‌شناختی و تعیین تأثیر گوناگون تغییرات اقلیمی، کاربری زمین‌ها، خصوصیات خاک و خصوصیات آبخیز بر شبیه‌سازی فرآیندهای آب‌شناختی استفاده شد.

جغرافیایی "۴۹°۱۸'۳۶" تا "۴۸°۲۱'۵۸" درجه و ۱۸ دقیقه و ۳۶ ثانیه تا ۴۸ درجه و ۲۱ دقیقه و ۵۸ ثانیه شرقی است (شکل ۱). میانگین سالانهٔ بارش و دما در بخش‌های گوناگون آبخیز به‌ترتیب از ۱۶۰ تا ۴۴۶ میلی‌متر و از ۱۶ تا ۲۳ °C متغیر است. بلندی آبخیز از ۱۰۵۰ تا ۳۹۵۰ متر از سطح دریا متغیر است. آب و

مشابهی با عنوان واحد پاسخ آب‌شناختی (HRU) را تشکیل می‌دهد و در این واحدها به‌شکل یکسان عمل می‌کند و فرایندهای آب‌شناختی را برآورد می‌کند (آرنولد و همکاران ۱۹۹۸). با این ویژگی، مدل SWAT می‌تواند تأثیر خصوصیات آبخیز بر فرایندهای آب‌شناختی را نشان دهد. در پژوهش‌های پرشماری از مدل SWAT برای ارزیابی تأثیر جنبه‌های گوناگون عامل‌های اقلیمی و خصوصیات آبخیز (کاربری زمین‌ها) بر فرایندهای آب‌شناختی استفاده شده است (سعید و همکاران ۲۰۲۱؛ منگیستو و همکاران ۲۰۲۲؛ تویسا و همکاران ۲۰۲۰).

با این حال، در پژوهش‌های اندکی تأثیر هم‌زمان پدیدهٔ خشک‌سالی و خصوصیات آبخیز بر تغذیهٔ سفره‌های آب زیرزمینی بررسی شده است. برای مثال، اسدی و همکاران (۲۰۲۲) اثرات خشک‌سالی‌های پرتکرار بر تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی را در گجرات غربی بررسی کردند و نشان دادند که تغییرات شدید بارش و بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی باعث کاهش قابل توجه تغذیهٔ آبخوان‌ها شد. لی و همکاران (۲۰۲۳) پیش‌بینی تغذیهٔ سفره‌های آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های سنجش از دور ارزیابی کردند و تأثیرگذاری استفاده از داده‌های مکانی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی و پیش‌بینی اثرات خشک‌سالی را تأیید کردند. با توجه به افزایش نرخ شش برابری استخراج آب‌های زیرزمینی در مقیاس جهانی در ۵۰ سال گذشته و روند رو به رشد ۱-۲٪ سالانه آن (هرسی و همکاران ۲۰۲۳) و دانش محدود ما از فرایندهای آب‌شناختی به‌ویژه منابع آب زیرزمینی، شناخت سنجه‌ها و الگوهای مؤثر بر تغذیه آب‌های زیرزمینی ضروری است. نتایج پژوهش‌ها نشان داده‌اند که نرخ‌های تغذیهٔ آب زیرزمینی تحت شرایط خشک‌سالی در

مواد و روش‌ها

معرفی منطقهٔ مطالعه‌شده

آبخیز دامغان‌رود با مساحت ۱۳۰۰۰۰ هکتار در منطقهٔ نیمه‌خشک در مرکز ایران با بلندهای متنوع و بارش انتخاب شد. این آبخیز میان عرض‌های جغرافیایی "۳۶°۲۱'۳۶" تا "۴۸°۲۱'۳۶" شمال و طول

بررسی شده در آبخیز به ترتیب شامل ایستگاه‌های فولاد محله، دامغان، چهارده دامغان، سمنان و شاهرود بودند. بر اساس داده کاربری خاک عمده کاربری‌های آبخیز شامل زمین‌های کشاورزی، زمین‌های باغی، جنگل با تراکم خیلی کم، جنگل با تراکم کم، جنگل با تراکم متوسط، مرتع متراکم، مرتع با تراکم کم، بوته‌زار و بیشه‌زار و مناطق شهری بودند. کدهای کاربری زمین‌های آبخیز دامغان رود در مدل SWAT در شکل ۲ نشان داده شده است. در آبخیز مطالعه شده چهار رده خاک شناسایی شدند که شامل مولی‌سویل^۱ انتی‌سویل^۲، آردیسویل^۳ و اینسپتی‌سویل^۴ بودند (شکل ۳). بر اساس مدل SWAT، آبخیز مطالعه شده به ۱۲ زیرآبخیز و ۶۶ واحد پاسخ آب‌شناختی تقسیم شد. بزرگ‌ترین زیرآبخیز با مساحت ۱۷۳/۷۸۱ کیلومترمربع و نه واحد پاسخ آب‌شناختی و کوچک‌ترین زیرآبخیز با مساحت ۹۷/۹۳ کیلومترمربع و هفت واحد پاسخ آب‌شناختی بود. همچنین، منطقه مطالعه شده در ۵ طبقه شیب (۰-۵، ۵-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و >۴۰٪) تقسیم‌بندی شد. نقشه‌های رقمی ارتفاع، نقشه شیب، نقشه خاک، نقشه کاربری زمین‌ها در آبخیز دامغان رود در شکل ۳ نشان داده شده است.

هوای آبخیز بر اساس روش دومارتن به شکل سرد خشک تا نیمه مرطوب است (رحیمی جوادیان ۲۰۱۸). انواع اصلی کاربری زمین‌ها شامل جنگل (بیشه‌زار و بوته‌زار، جنگل‌های با تراکم بسیار کم، کم و متوسط)، مراتع (مراتع با تراکم زیاد، متوسط و کم)، زمین‌های کشاورزی (کشاورزی آبی و زمین‌های باغی) و زمین‌های بایر (زمین‌های بدون پوشش و زمین‌های صخره‌ای) است. خاک‌های منطقه مطالعه شده عمدتاً روی رسوبات آبرفتی کواترنر گسترش یافته‌اند. این خاک‌ها روی سازندهای زمین شناسی غنی از سنگ آهک که عمدتاً از لایه‌های سنگ آهک و مارن تشکیل شده است، تشکیل شده‌اند (رحیمی جوادیان ۲۰۱۸). روندنمای مراحل انجام پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.

داده‌های ورودی مدل SWAT

داده‌های ورودی لازم برای اجرای مدل SWAT در جدول ۱ نشان داده شده است.

برای بررسی صحت و درستی داده‌های اندازه‌گیری رواناب، همبستگی میان داده‌های آب‌دهی و بارش بررسی شد. ایستگاه‌های باران‌سنجی و همدید

جدول ۱- داده‌های لازم و مشخصات آن‌ها برای اجرای مدل SWAT.

Table 1- Required data and their specifications for SWAT model implementation.

Type data	Scale	Source	Description
Digital Elevation Map	30-meter	Extracted from the watershed topography	-
Land Use/Land Cover Map	1:25000m	Country Mapping Organization with a resolution of 30 meters	It was investigated by the General Department of Natural

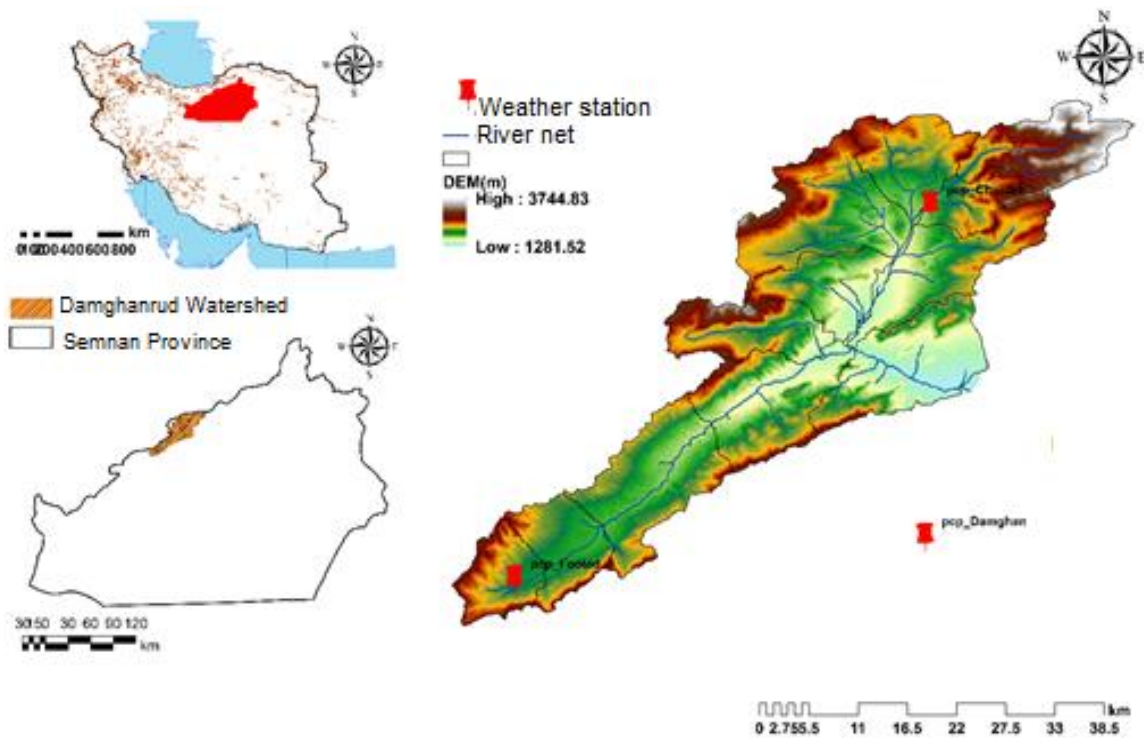
3- Ardisoil

4- Inceptisoil

1- Molisoil

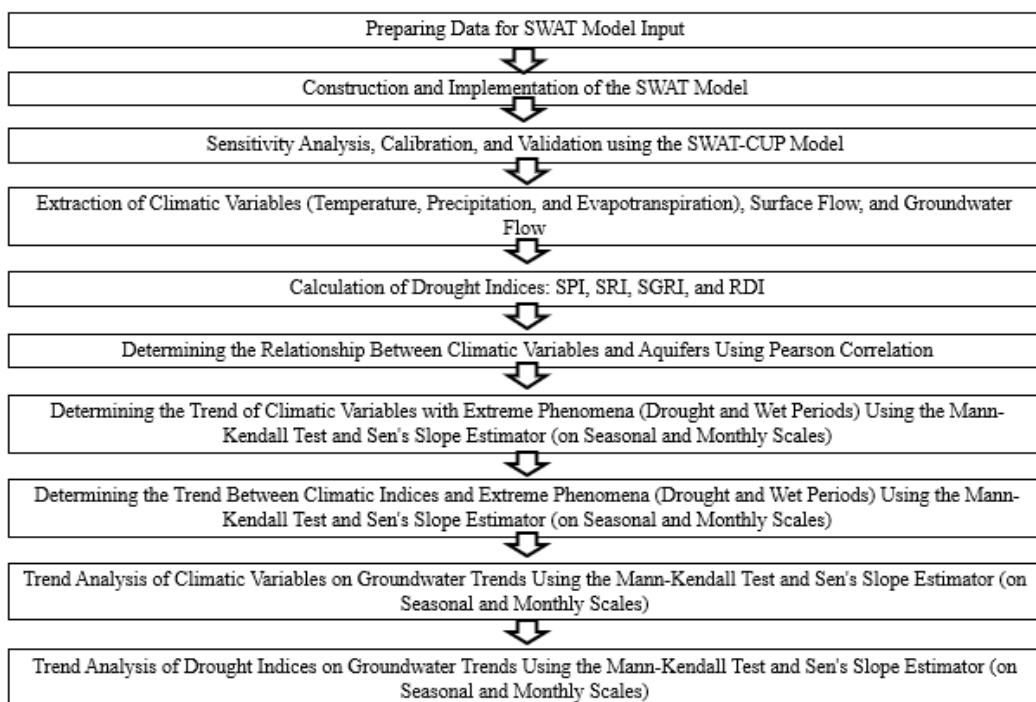
2- Entisoil

Soil Map	30-meter	World soil map	Resources of Semnan Province using field studies. Some physical and chemical properties along with soil groups in the global soil map used in the SWAT model
meteorological data	climatology 5 stations and one hydrometer station,	Semnan Regional Meteorological and Water Organization	Minimum and maximum temperature and daily precipitation for a period of 30 years (1992-2022)
observational runoff	11 years of daily runoff data,	Semnan Regional Water Organization	(2008-2018)



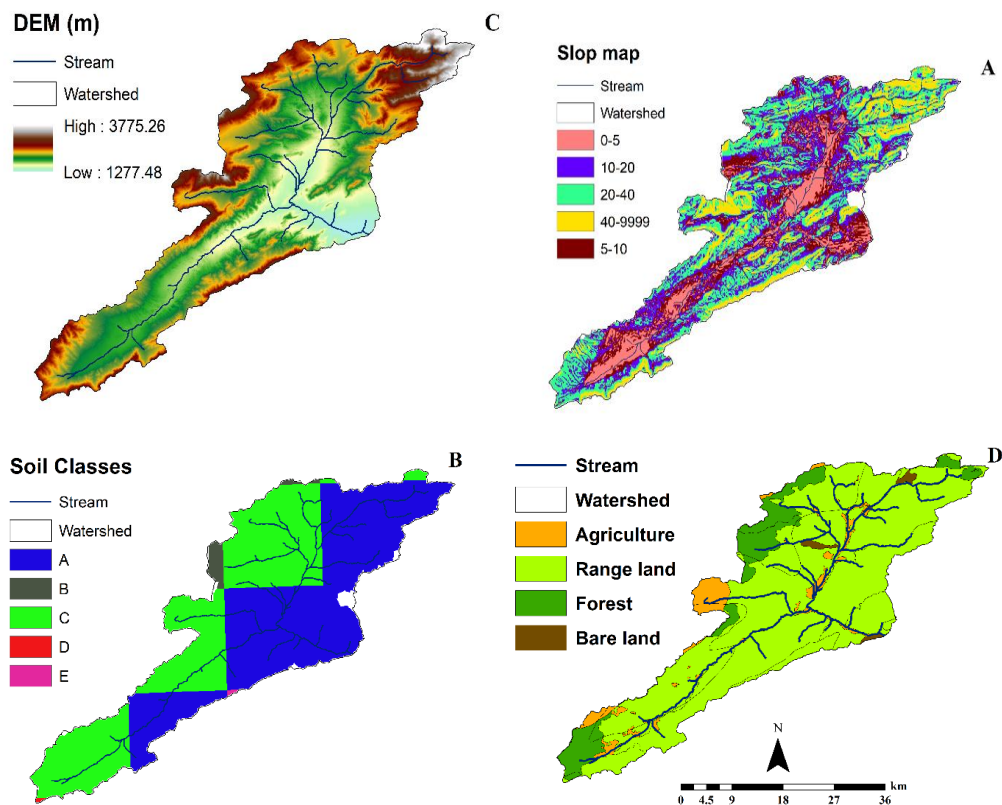
شکل ۱- موقعیت منطقهٔ مطالعه‌شده در استان سمنان و ایران.

Figure 1- Location of the study area in Semnan province and Iran.



شکل ۲- روندنمای مراحل پژوهش.

Figure 2-Trend Chart of Research Steps



شکل ۳- نقشه رقومی ارتفاع (C)، نقشه شیب (A)، نقشه کاربری زمین‌ها (D)، نقشه خاک (B).

Figure 3- Digital Elevation Map (C), Slope Map (A), Land use Map (D), Soil Map (B).

ساختار مدل SWAT

در این پژوهش از ArcSWAT2012 برای مدل‌سازی فرایندهای آب‌شناختی استفاده شد. برای رسم آبخیز، آبراهه‌ها و شیب آبخیز از DEM با وضوح ۳۰ متر استفاده شد. واحدهای آب‌شناختی آبخیز (HRU)^۵ به‌وسیلهٔ نقشه‌های شیب، کاربری زمین‌ها و خاک محلی رسم شد. واحدهای HRU زیرمجموعه‌های منحصر به فردی از مدل بودند که از لحاظ خاک، کاربری زمین‌ها و شیب مشابه بودند. این واحدها اساس محاسبات دقیق تعادل آب و رسوب در آبخیز بودند (بیلی و همکاران ۲۰۱۶؛ تیگابو و همکاران ۲۰۲۰). محاسبهٔ فرایندهای آب‌زمین‌شناختی بر اساس درصد هر HRU در آبخیز انجام شد (بیلی و همکاران ۲۰۱۶). در این پژوهش فرآیند آب‌زمین‌شناختی شبیه‌سازی‌شده در مدل SWAT بر اساس معادلهٔ تعادل آب و با استفاده از رابطهٔ ۱ تعیین شد. (وو و همکاران ۲۰۱۵).

$$SW_t = (SW_0 + \sum_{i=1}^t R_{day}(i) - Q_{surf}(i) - E_{sub}(i) - W_{seep}(i) - Q_{gw}(i)) \quad (1)$$

SW_t : محتوای آب نهایی، SW_0 : محتوای آب اولیه خاک (میلی‌متر در روز i), R_{day} , Q_{surf} , E_{sub} , W_{seep} و Q_{gw} : به ترتیب اندازهٔ بارندگی، رواناب، ET، نشت آب به لایه بالایی خاک و جریان برگشتی (میلی‌متر در روز i) است. واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت مدل SWAT واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT با استفاده از رواناب ماهانه (۲۰۱۸-۲۰۰۸) در ایستگاه آب‌سنجی در خروجی آبخیز انجام شد. برای گرم کردن مدل از داده‌های رواناب ماهانه (۲۰۰۹-۲۰۰۸) استفاده شد. واسنجی مدل با استفاده از داده‌های رواناب ماهانه (۲۰۱۴-۲۰۱۰) انجام شد. برای اعتبارسنجی مدل از داده‌های رواناب ماهانه (۲۰۱۸-۲۰۱۵) استفاده شد. واسنجی، نبودن قطعیت و تجزیه و تحلیل حساسیت مدل SWAT در نرم افزار (SWAT-CUP) با استفاده از دستورالعمل SUFI2 و تحلیل حساسیت برای تعیین سنجه‌های مؤثر بر شبیه‌سازی جریان انجام شد (عباسپور ۲۰۱۱). سنجه‌های استفاده‌شده در مرحلهٔ

واسنجی با اندازه‌های مرزی سنجه‌ها بر پایهٔ پیشنهاد (عباسپور ۲۰۱۱) برای تکرار اولیه انتخاب شدند و سنجه‌های حساس و مهم بر اساس اندازه‌های آمارهٔ t-stat بیشتر و p-value کمتر تعیین شدند (وانگ و همکاران ۲۰۲۰). سپس، سنجه‌های حساس آب‌شناختی انتخاب و اندازه‌های آنها در طول واسنجی اصلاح شد. برای ارزیابی عملکرد مدل، ضریب‌های کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، ضریب تبیین R^2 درصد سوگیری (PBIAS)^۴ استفاده شد. (موریاسی و همکاران ۲۰۰۷) گزارش دادند، $NSE > 0.50$ ، $R^2 > 0.70$ برای داده‌های جریان، قابل قبول است (جدول ۴).

محاسبهٔ داده‌های آب زیرزمینی

در بررسی تأثیر پدیدهٔ خشک‌سالی روی آب‌های زیرزمینی، در نظر گرفتن تعاملات میان متغیرهای مؤثر روی آب‌های زیرزمینی در آبخیزها بسیار با اهمیت است (آلن و همکاران ۲۰۱۰). در ساختارهای جریان، آبخوان‌ها به شکل یک ساختار دو عضوی که ساز و کار پاسخ را تشکیل می‌دهند، طبقه‌بندی می‌شوند. این ساختار شامل؛ ساختار مبتنی بر تغذیه و ساختار جریان محور است. در ساختار مبتنی بر تغذیه، تغذیهٔ پراکنده روی ردپای آبخوان باعث افزایش سطح آب‌های زیرزمینی می‌شود. از این رو، پاسخ افزایش سطح آب زیرزمینی سبب هدایت جریان در ساختارهای جریان محور می‌شود و جریان را افزایش می‌دهد و کاهش در جریان باعث کاهش سطح آب زیرزمینی می‌شود. در این ساختار، تغییرات اندازه‌های جریان، پاسخ سطح آب زیرزمینی را هدایت می‌کند (آلن و همکاران ۲۰۱۰). در این پژوهش نیز معیار عملکرد و تعاملات آبخوان و متغیرهای اقلیمی ساختار نامبرده در نظر گرفته شد. بر این اساس در این پژوهش برای شبیه‌سازی ساختار آبخوان و جریان از مدل SWAT استفاده شد. به این ترتیب که اندازه‌های رواناب ماهانه و میانگین تغذیهٔ آب زیرزمینی ماهانه برای دورهٔ پایه (۲۰۱۸-۲۰۰۸) برآورد شد. از آنجایی که مدل SWAT در شبیه‌سازی سفره‌های آب زیرزمینی آبخوان‌های کم‌ژرفا و ژرف را

خشک‌سالی (RDI) برای پایش تأثیر تبخیر-تعرق روی خشک‌سالی استفاده شد (تارکی و ایوک ۲۰۲۲؛ مولینا و همکاران ۲۰۲۲)

شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

مک‌کی و همکاران (۱۹۹۳) شاخص SPI را برای پایش خشک‌سالی در دوره‌های مرطوب و خشک ارائه دادند. این شاخص برای تجزیه و تحلیل خشک‌سالی‌های هواشناسی بسیار رایج و مرسوم است و برای تجزیه و تحلیل خشک‌سالی آب‌شناختی نیز در بازه‌های زمانی (۱۲، ۲۴ ماه) استفاده می‌شود (یلماز ۲۰۱۹). در این پژوهش از این شاخص خشک‌سالی برای پایش خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی (۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ ماهه) استفاده شد. برای محاسبه شاخص SPI، داده‌های بارش تجمعی برای هر یک از مقیاس‌های زمانی تعیین شد و با تابع توزیع احتمال گاما برازش داده شد (موکا و مورکام ۲۰۲۲؛ بارکر و همکاران ۲۰۱۶). داده‌های بارش به یک توزیع بهنجار معمولی با میانگین و انحراف معیار ۰ و ۱ تبدیل شدند (موکا و مورکام ۲۰۲۲). سرانجام، از شاخص SPI برای نشان دادن تغییرپذیری خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی گوناگون استفاده شد. در این پژوهش با استفاده از رابطه ۴ شاخص SPI محاسبه شد.

$$SPI = \left(\frac{X_i - X_m}{\sigma} \right) \quad (4)$$

X_m : میانگین بارندگی (ماهانه، فصلی یا سالانه (میلی‌متر))، σ : انحراف استاندارد بارندگی ثبت‌شده، X_i : اندازه بارندگی (ماهانه، فصلی یا سالانه (میلی‌متر)) است.

شاخص رواناب استاندارد شده (SRI)

با توجه به ورودی‌های لازم برای شاخص‌های خشک‌سالی، شاخص‌های تجزیه و تحلیل خشک‌سالی آب‌شناسی محدودتر هستند. شاخص رواناب استاندارد شده (SRI) از ساده‌ترین و پرکاربردترین

به‌شکل مجزا در HRU ها در نظر می‌گیرد و تأثیر کمتر سفره‌های ژرف در تغذیه آبخوان‌ها در آبخیز مطالعه‌شده، در این پژوهش، اندازه‌های تغذیه آب‌های زیرزمینی قبل از تقسیم اندازه‌های تغذیه در آبخوان‌های کم‌ژرفا و ژرف در نظر گرفته شد. اندازه‌های تغذیه آبخوان با استفاده از معادله‌های ۲ و ۳ محاسبه شد (هرسی و همکاران ۲۰۲۳).

$$\begin{aligned} wrchrg.i &= \left(1 - e^{(-1/\delta_{gw})} \right) wseep \\ &+ \left(e^{(-1/\delta_{gw})} . wrchrg.i - 1 \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$wrchrg.i = wrchrg.sh + wdeep \quad (3)$$

$Wrchrg.i$: اندازه تغذیه ورودی به سفره‌های زیرزمینی در روز i (میلی‌متر)، δ_{gw} : زمان تأخیر (روزها)، $wseep$: اندازه کل آب خروجی از کف نیمرخ خاک در روز i (میلی‌متر)، $Wrchrg.i-1$: اندازه تغذیه ورودی به سفره‌های آب زیرزمینی در روز قبل از روز i (میلی‌متر)، Sh : اندازه تغذیه آبخوان کم‌ژرفا در روز i (میلی‌متر)، $wdeep$: اندازه تغذیه آبخوان ژرف در روز i (میلی‌متر) است.

شاخص‌های پایش خشک‌سالی

اساسی‌ترین راه برای پایش خشک‌سالی هواشناسی و آب‌شناختی، شاخص‌های خشک‌سالی است (ندایراگیجه و لی ۲۰۲۲)، انتخاب شاخص مناسب خشک‌سالی تحت تأثیر متغیرهای پرشماری است که شامل حجم داده‌های ورودی لازم، در دسترس بودن داده‌ها، هدف پژوهش، اقلیم، منحصر به فرد بودن شاخص و اعتبار آن‌ها است (تارکی و ایوک ۲۰۲۲). در این پژوهش از چهار شاخص، بارش استاندارد شده (SPI)^۷، برای پایش خشک‌سالی هواشناسی، شاخص رواناب استاندارد شده (SRI)^۸، برای پایش خشک‌سالی آب‌شناختی، شاخص آب زیرزمینی استاندارد شده (SGRI)^۹ برای پایش خشک‌سالی آب زیرزمینی و شاخص شناسایی

10- Drought Index Recognition

7- Drought Index Precipitation- Standard

8- Streamflow Drought Index

9- Standard groundwater recharge index

GW: میانگین تغذیهٔ آبخوان (ماهانه، فصلی یا سالانه (میلی‌متر))، σ : انحراف استاندارد تغذیهٔ آبخوان ثبت‌شده، GW_i : اندازهٔ تغذیهٔ آبخوان (ماهانه، فصلی یا سالانه (میلی‌متر)) است (بلوم‌فیلد و مارچنت ۲۰۱۳).

شاخص شناسایی خشک‌سالی (RDI)

برای غلبه بر ناتوانی SPI در درک اثرات غیرمستقیم دما بر تعادل آب، شاخص RDI، به‌وسیلهٔ تساکیریس و ونجلیس به‌عنوان یک نسخه توسعه‌یافته از شاخص خشک‌سالی ارائه شد (تساکیریس و ونجلیس ۲۰۰۵). این شاخص در مناطق گرم و خشک با شاخص SPI همبستگی ۰.۹۹٪ داشت. این شاخص در مقایسه با شاخص SPEI (با همبستگی کمتر از ۰.۵۰٪) می‌تواند نقش تبخیرتعلق در تشدید خشک‌سالی را به‌خوبی نشان دهد. در ایران در اقلیم‌های گوناگون نتایج مشابهی (بنی‌مهد و خلیلی ۱۳۹۲) گزارش شده است. در ترکیه کاتی‌پوغلو و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از شاخص‌های RDI و SPEI خشک‌سالی را پیش‌کردند. نتایج الگوهای خشک‌سالی پیش‌شده در این پژوهش با دو شاخص RDI و SPEI مشابه یکدیگر بودند. بذرافشان و همکاران (۲۰۱۹) از شاخص‌های SPI، SPEI، RDI برای پیش‌خشک‌سالی در شرایط آب و هوایی خشک، فراخشک و سرد استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد در مناطق خشک و فراخشک، شاخص RDI در مقایسه با شاخص SPEI شاخص کارآمدتری برای محاسبه شدت، مدت و فراوانی خشک‌سالی بود. از این رو در این پژوهش از شاخص RDI استفاده شد. با استفاده از شاخص RDI می‌توان هم بارش و هم دما را به‌عنوان داده‌های ورودی در نظر گرفت (اسدی زارچ و همکاران ۲۰۱۱). تبخیرتعلق یک عامل مرتبط با دما است که RDI آن را در نظر می‌گیرد. در این پژوهش برای محاسبه RDI از نسبت کل بارش به تبخیر و تعلق بالقوه استفاده شد (رابطهٔ ۷). تبخیرتعلق بالقوه با استفاده از اندازه‌های دما در بیشترین و کمترین نقطهٔ محاسبه می‌شود (زارعی و همکاران ۲۰۱۱). شرایط خشک‌سالی با استفاده از محدوده SPI طبقه‌بندی شد.

شاخص‌های خشک‌سالی آب‌شناختی است که به‌وسیلهٔ پژوهشگران بسیاری برای پیش‌خشک‌سالی آب‌شناختی استفاده شده است (جهانگیر و یاراحمدی ۲۰۲۰؛ وامبوا ۲۰۱۹؛ ووبنه و همکاران ۲۰۲۳). این شاخص به‌وسیلهٔ نال‌بانته و تساکیریس (۲۰۰۹) برای توصیف خشک‌سالی آب‌شناختی ارائه شد. شاخص SRI با محاسبهٔ حجم جریان ماهانه این قابلیت را دارد که کمبود تأمین آب در بازه‌های زمانی گوناگون را محاسبه کند (بوداد و همکاران ۲۰۱۸). در این پژوهش شاخص SRI در زمان‌های مرجع گوناگون q در سال آب‌شناختی n با استفاده از رابطهٔ ۵ محاسبه شد.

$$SRI = \frac{V_{nq} - V_{qm}}{\sigma} \quad (5)$$

V_{qm} : میانگین رواناب (ماهانه، فصلی یا سالانه (میلی‌متر))، σ : انحراف استاندارد رواناب، V_{nq} : رواناب (ماهانه، فصلی و سالانه (میلی‌متر)) است (بوداد و همکاران ۲۰۱۸).

شاخص تغذیه آب‌زیرزمینی استاندارد (SGRI)

این شاخص بر اساس شاخص SPI تدوین شده است و محاسبهٔ این شاخص بر اساس تبدیل نمرهٔ بهنجار ناسنجه‌ای برای هر ماه از میانگین سطح آب زیرزمینی است (بلوم‌فیلد و مارچنت ۲۰۱۳). این شاخص به‌دلیل سادگی و انعطاف‌پذیری در مقیاس‌های زمانی گوناگون در مقایسه با دیگر شاخص‌ها کارایی بیشتری دارد. این شاخص بر اساس علامت SGRI به دورهٔ خشک‌سالی و ترسالی طبقه‌بندی می‌شود و شدت خشک‌سالی براساس منفی بودن شاخص SGRI تفکیک می‌شود. در این پژوهش برای محاسبهٔ تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی از این شاخص استفاده شد. این شاخص در دسته‌هایی با سری زمانی مشابه سازمان‌دهی شد و برای تشکیل یک سری زمانی پیوسته، ترکیب شد و نتایج آن با شاخص SPI، RDI و SRI بررسی شد. سرانجام، همبستگی میان SGRI، RDI، SPI و SRI در آبخیز در مقیاس‌های زمانی (ماهانه، فصلی و سالانه) تجزیه و تحلیل شد.

$$SGRI = \left(\frac{GW_i - GW_m}{\sigma} \right) \quad (6)$$

باران‌سنج دوم و مشاهده ژام (میلی‌متر) است (تساکیریس و ونجلیس ۲۰۰۵).
برای طبقه‌بندی آب و هوا با توجه به معیار (مک‌کی و همکاران ۱۹۹۳)، SPI، SRI، SGRI و RDI به هفت سطح تقسیم شد (جدول ۲).

$$RDI = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{P_{ij}}{PET_{IJ}} \right) \quad (7)$$

PET_{IJ}: تبخیر بالقوه فصلی در ایستگاه باران‌سنج و مشاهده ژام (میلی‌متر)، P_{ij}: بارش فصلی در ایستگاه

جدول ۲- طبقه‌بندی آب و هوا بر اساس اندازه‌های SPI، SRI و SGRI (مک‌کی و همکاران ۱۹۹۳).
Table 2- Climate classification based on SPI, SRI and SGRI values (McKay et al., 1993).

Classification of drought	Index value
Extremely wet (EW)	>2
Very wet (VW)	1.99-1.5
Moderately wet (MW)	1.49-1
Near normal (NN)	99.0 to- 0.99
Moderate drought (MD)	-1 to -1.49
Severe drought (SD)	-1.5 to -1.99
Extreme drought (ED)	-2<

اندازه‌های متغیر X می‌تواند هریک از شاخص‌های DRI، RI، SPI و SGRI باشد و براساس نوع شاخص روند آن سنجه تعیین می‌شود.
سری زمانی X_i از n، 1، 2، ...، n از X_j از j = i + 1 ... n است. در این پژوهش آمار آزمون بهنجار شده با استفاده از معادله ۱۰ محاسبه شد.

$$Z_c = \left\{ \begin{array}{l} \frac{s-1}{\sqrt{Var(s)}} \cdot S \leq 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{Var(s)}} \cdot S > 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

Z_c: آزمون آماری است و وقتی $|Z_c| > Z_{1-\alpha/2}$ باشد، که در آن $Z_{1-\alpha/2}$ متغیرهای بهنجار استاندارد و α اهمیت است. سطح برای آزمون، H₀ رد خواهد شد. اندازه روند به شکل زیر آورده شده است.

$$Var(s) = \frac{m(-1)(2m+5) - \sum_{k=1}^m k_1(k_1-1)(2k_1+5)}{18} \quad (11)$$

Var(s): واریانس، m: اندازه سری‌های زمانی SPI، SRI و SGRI، k_i: پیوندهای میان سری‌های زمانی نمونه هستند (پین‌گال و همکاران ۲۰۱۶: مان ۱۹۴۵).

ب- روش برآوردگر شیب سن
برآوردگر Theil-Sen estimator (SS) در ارزیابی بزرگی روند در مقایسه با روش‌های وایازی خطی قدرتمندتر عمل می‌کند، زیرا تحت تأثیر اندازه‌های

تحلیل روند الگوی زمانی خشک‌سالی

الف- روش آزمون من-کندال

برای شناسایی الگوهای جریان و بارندگی از روش‌های گوناگونی مانند رویکردهای آماری و آزمون‌های مبتنی بر رتبه استفاده می‌شود (پین‌گال و همکاران ۲۰۱۶).
روش‌های آماری شامل آزمون‌های مبتنی بر شیب، وایازی خطی حداقل مربعات، برآوردگر شیب سن و آزمون‌های مبتنی بر رتبه مانند آزمون من-کندال (MK) هستند (پین‌گال و همکاران ۲۰۱۶: مان ۱۹۴۵).
در این پژوهش از آزمون من-کندال برای تشخیص روند الگوی پدیده خشک‌سالی (خشک‌سالی هواشناسی، آب‌شناختی) روی تغذیه سفره آب زیرزمینی در سطح اعتماد ۹۵٪ بر اساس ارزش توالی‌های زمانی DRI، SRI، SPI و SGRI استفاده شد.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(X_j - X_i) \quad (8)$$

$$\text{sgn}(X_k - X_i) = \begin{cases} 1. \text{if}(X_j - X_i) > 0 \\ 0. \text{if}(X_j - X_i) = 0 \\ -1. \text{if}(X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

شاخص SRI (اثرات بارش و رواناب) و شاخص SGRI (اثرات تغذیهٔ سفره آب زیرزمینی) بررسی شد.

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت سنج‌های مؤثر بر رواناب

بررسی نتایج آزمون حساسیت بر اساس اندازه‌های t -stat به‌دست آمده برای هر سنج نشان داد بیشترین اندازهٔ حساسیت مربوط به سنج‌های شمارهٔ منحنی (CN_2) ، میانگین طول شیب $(SLSUBBSN)$ ، ضریب زبری کانال مانینگ (CH_N_2) ، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (SOL_K) ، ژرفای خاک از لایه سطحی تا لایه زیرین خاک (SOL_Z) ، ضریب جریان پایه آلفا $(ALPHA_BF)$ فرآیندهای حداقل ژرفای لازم سطح ایستابی در سفره‌های کم‌ژرفا برای رخداد جریان بازگشتی $(GWQMN)$ ، عامل جبران‌کننده تبخیر از خاک $(ESCO)$ ، ضریب مانینگ برای جریان روی سطح زمین (OV_N) ، بود. سنج‌های CN_2 ، SOL_K ، SOL_Z و OV_N ، در تولید رواناب سطحی، $GWQMN$ و $ALPHA_BF$ بر حرکت زیرسطحی آب و $ESCO$ بر تبخیر و تعرق مؤثر بودند. در این راستا، هرسی و همکاران (۲۰۲۳) نیز سنج‌های مشابهی را در تحلیل حساسیت رواناب با مدل SWAT گزارش کردند.

واسنجی و اعتبارسنجی رواناب

پس از شناسایی سنج‌های حساس، واسنجی مدل SWAT با اجرای ۲۵۰۰ بار در چندین مرحله تنظیم شد و اجرای آن به تکرارهای چندگانه تقسیم شد. نتایج مدل بر اساس معیارهای ارزیابی در مرحلهٔ واسنجی و اعتبارسنجی جریان نسبتاً خوب ارزیابی شد. نتایج ضریب‌های کارایی مدل در دورهٔ واسنجی و اعتبارسنجی در جدول ۳ نشان داده شده است.

بزرگ نیست (سن ۱۹۶۸). بر اساس مشاهده‌های X_1, X_2, \dots, X_n بارندگی در زمان‌های t_1, t_2, \dots, t_n با $(t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n)$ برای هر N جفت مشاهده X_j و X_i که در زمان‌های t_j و t_i بودند، شیب Q_k با استفاده از رابطه ۱۲ محاسبه شد.

$$Q_k = \frac{X_j - X_i}{t_j - t_i} \quad (12)$$

for $K = 1, \dots, N$
 $(1 \leq i \leq j \leq n)$ and $t_1 \leq t_2$.

برآورد روندها در گروه داده‌های X_1, X_2, \dots, X_n را می‌توان به‌عنوان Q_{med} شیب میانه N با استفاده از اندازه‌های شیب Q_k که از کوچک‌ترین به بزرگ‌ترین رتبه‌بندی می‌شود، محاسبه کرد.

$$Q_{med} = \begin{cases} Q_{[N+1/2]} & \text{if N is odd} \\ (Q_{[N/2]} + Q_{[N+2/2]})/2 & \text{if N is even} \end{cases} \quad (13)$$

$$Q_{med} = \begin{cases} Q_{[N+1/2]} & \text{if N is odd} \\ (Q_{[N/2]} + Q_{[N+2/2]})/2 & \text{if N is even} \end{cases} \quad (14)$$

Q_{med} نشان‌دهندهٔ روند است و اندازهٔ آن بزرگی روند را نشان می‌دهد (سن ۱۹۶۸).

شناسایی ارتباط متغیرهای اقلیمی روی تغذیه آبخوان‌ها

تغییرات متغیرهای اقلیمی بارش و دما در یک دورهٔ ۳۰ ساله بررسی شد. افزون بر این، رواناب و تبخیر-تعرق در دورهٔ زمانی (۲۰۱۸-۲۰۱۰) با رخداد‌های خشک‌سالی و ترسالی در مقیاس‌های زمانی گوناگون (ماهانه، فصلی و سالانه) نیز بررسی شد. با استفاده از روش همبستگی پیرسون ارتباط این متغیرها با تغذیهٔ سفره‌های آب‌زیرزمینی تعیین شد. اثرات خشک‌سالی روی این متغیرها و روی تغذیهٔ سفره‌های آب‌زیرزمینی با استفاده از شاخص RDI (اثرات تبخیر-تعرق)، شاخص SPI و

جدول ۳- نتایج ضریب‌های کارایی در دوره واسنجی و اعتبارسنجی.

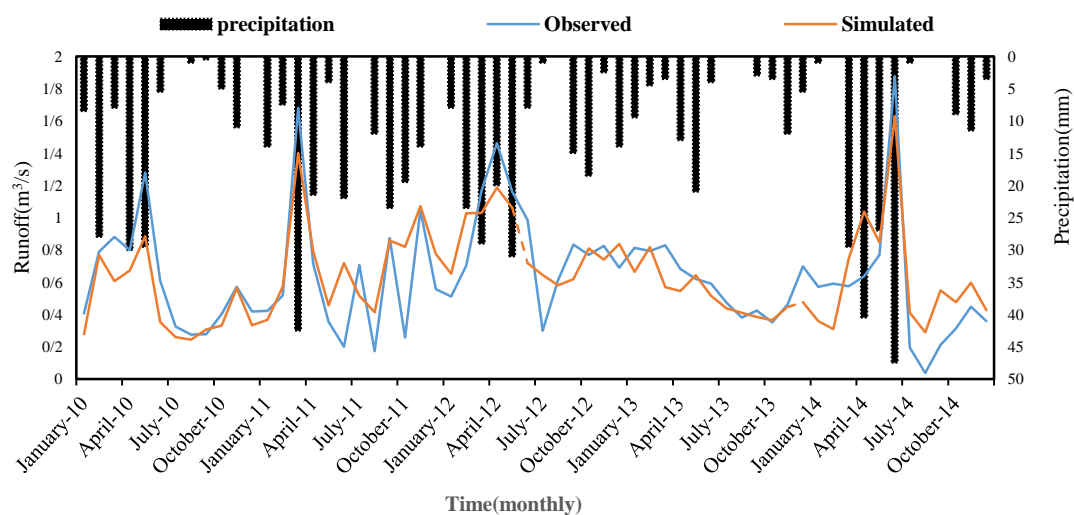
Table 3- The results of efficiency coefficients in the calibration and validation period.

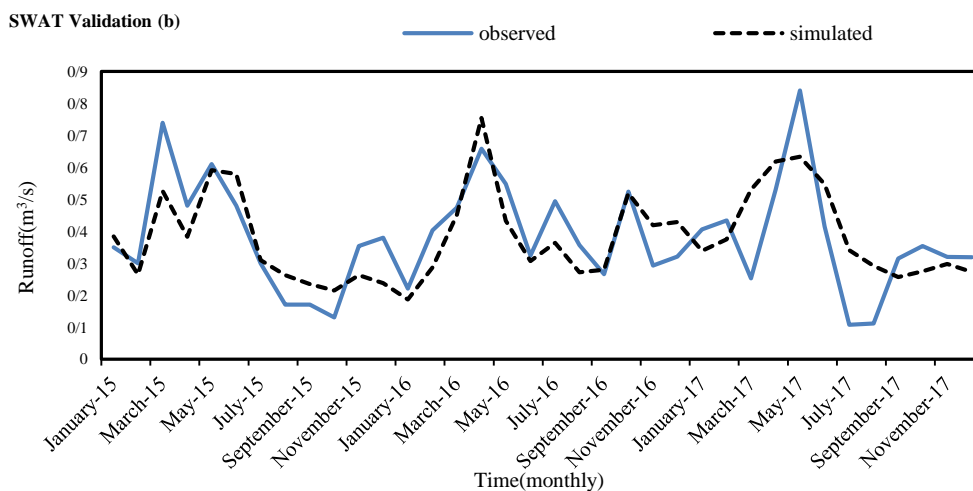
Statistical indicators	Calibration	validation
Nash-Sutcliffe coefficient	0.69	0.77
Coefficient of explanation	0.74	0.79
PBIAS	9.9	9.2
Average annual precipitation	150	130
Runoff standard deviation	0.21	0.14
Standard deviation of precipitation	12.1	10.72

سال‌های خشک دانست (عباس‌پور و همکاران ۲۰۰۷). زیرا جریان رواناب در سال‌های خشک و کم‌باران در اکثر شرایط اندک بود و اصولاً وضعیت جریان گسسته بود و فقط برای بارش‌های با اندازه‌های زیاد، جریان رواناب به شکل پیوسته بود. در حالی که در سال‌های مرطوب پیوستگی وضعیت جریان برای شبیه‌سازی جریان رواناب کافی بود. از این‌رو، در سال‌های مرطوب مدل عملکرد بهتری نشان داد. در این راستا علی‌زاده (۲۰۱۳) و خسروی و همکاران (۲۰۲۰) نتایج مشابهی از واسنجی مدل در سال‌های مرطوب و خشک گزارش کرده‌اند. تغییرات الگوی زمانی تغذیه آب‌های زیرزمینی در مقیاس ماهانه در شکل ۶ ارائه شده است.

اندازه‌های رواناب ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که بر اساس بارش، مدل توانست رخداد اندازه‌های بیشترین رواناب را به خوبی شبیه‌سازی کند و این موضوع نشان‌دهنده توانایی مدل در اصلاح اندازه‌های نفوذ متناسب با آب در دسترس در کل نیم‌رخ خاک است. همچنین، بر پایه شکل ۴ شبیه‌سازی اندازه‌های رواناب در سال‌های ۲۰۱۱، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۴ با اندازه‌های بارش به ترتیب ۲۱۰، ۱۵۲ و ۱۷۰ میلی‌متر به دست آمد که در مقایسه با اندازه بارش عادی (۱۵۰ میلی‌متر) بهتر بود. یکی از دلایل آن را می‌توان پیوستگی جریان در سال‌های مرطوب در مقایسه با

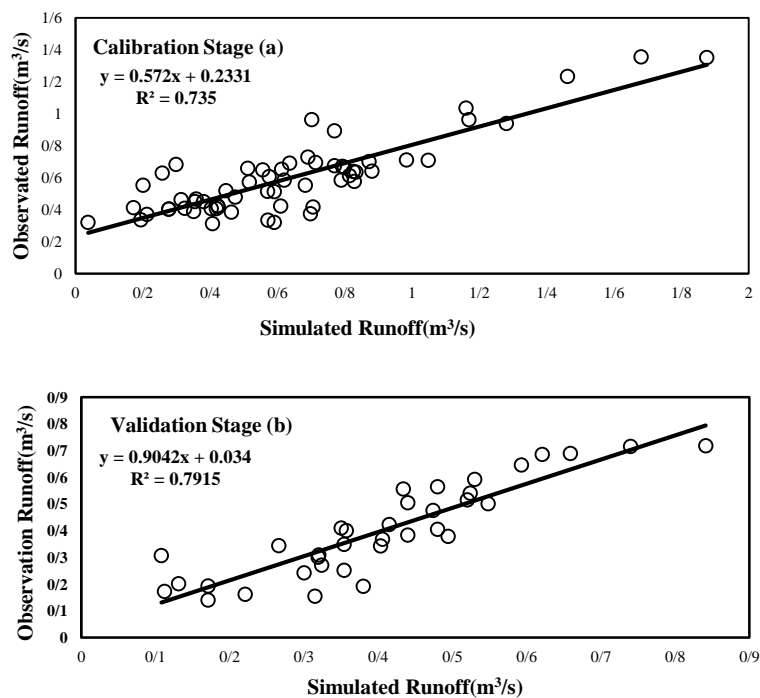
SWAT Calibration (a)





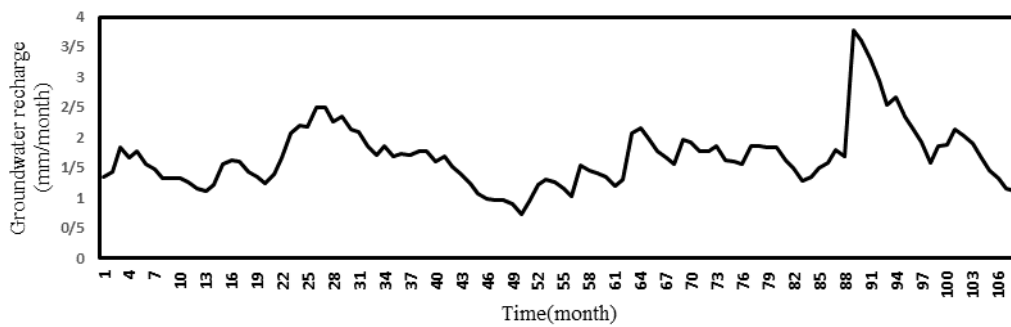
شکل ۴- اندازه‌های رواناب ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با بارش هم‌زمان با آن در دوره‌های واسنجی (الف)، اعتبارسنجی (ب).

Figure 4- Observed and simulated monthly runoff values with concurrent rainfall during the calibration periods(a), and validation period(b).



شکل ۵- همبستگی و اندازه‌های ضریب‌های تبیین میان اندازه‌های رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مدل SWAT در مرحلهٔ واسنجی (الف) و اعتبارسنجی (ب).

Figure 5- Correlation and the values of explanatory coefficients between observed and simulated runoff values in the SWAT model in the calibration periods(a) and validation periods(b).



شکل ۶- الگوی زمانی تغذیه ماهانه آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در دوره زمانی مطالعه‌شده.

Figure 6- Time pattern of monthly groundwater recharge simulated in the SWAT model in the calibration and validation periods.

دما و بارش نیز با اندازه‌های همبستگی به ترتیب ۱۵٪ و ۱۰٪ در درجات بعدی اهمیت تأثیر بر تغذیه آبخوان‌ها بودند. ارتباط میان بارش و رواناب مستقیم و تبخیر تعرق و دما معکوس بود. ضریب همبستگی پیرسون میان متغیرهای اقلیمی و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی در جدول ۴ نشان داده شده است.

شناسایی ارتباط سنج‌های اقلیمی با تغذیه آبخوان‌ها برای تعیین ارتباط میان متغیرهای بارش، رواناب، دما و تبخیر تعرق با تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. نتایج نشان داد جریان‌های سطحی با همبستگی حدود ۴۵٪ بیشترین تأثیر را بر تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی داشتند و تبخیر تعرق با همبستگی ۳۰٪ در درجه دوم اهمیت بود.

جدول ۴- ضریب همبستگی پیرسون میان متغیرهای اقلیمی و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی.

Table 4- Pearson's correlation coefficient between climate variables and underground water.

climate variable	Pearson's correlation coefficient
Precipitation	10%
Runoff	45%
Temperature	15%
Evaporation	30%

و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند ویژگی‌های دما و تبخیر، محرک‌های اصلی در ایجاد روند خشک‌سالی بود و سبب تغییرات بیشتر بارندگی در فصل مرطوب (فصل بارش) در مقایسه با فصل‌های خشک شدند. فورماتا و پیانوسی (۲۰۲۰) گزارش دادند که افزایش فراوانی و شدت خشک‌سالی‌ها باعث کاهش قابل توجهی در اندازه تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی شد. نتایج تحلیل روند داده‌های جریان سطحی نشان داد که روند این متغیر در سطح ماهانه معنی‌دار نبود. در فصل بهار اندازه‌های رواناب افزایش یافت و در فصل زمستان و پاییز کاهش یافت که با توجه به اندازه‌های بارش قابل انتظار بود. از این رو، اندازه‌های رواناب آبخیز می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر خشک‌سالی روی فرایندهای آب‌شناختی آبخیز

الگوی زمانی متغیرهای اقلیمی در سطوح ماهانه، فصلی

نتایج بررسی روند رواناب، بارش، دما و تبخیر تعرق و تغذیه آبخوان‌ها با استفاده از آزمون من-کندال نشان داد در گروه داده‌های بارش ماهانه در سطح اطمینان ۹۵٪، روند معنی‌داری مشاهده نشد. روند بارش در فصل‌های پاییز و زمستان کاهشی بود. بیشترین کاهش بارش در فصل پاییز با ۳۰٪ و کمترین کاهش بارش در فصل زمستان با ۱۰٪ مشاهده شد. دلیل روند کاهش بیشتر بارش در فصل پاییز در مقایسه با فصل زمستان می‌تواند به سبب تأثیر بلندمدت افزایش دما در فصل گرم باشد که سبب کاهش بیشتر بارش در فصل پاییز شد. در این راستا سماواتی و همکاران (۲۰۲۳)، آچیت

کمیود آبی (خشک‌سالی) در فصل‌های خشک در مناطق خشک و نیمه‌خشک، شود. این یافته‌ها نشان‌دهندهٔ این است که واکنش فصل‌های خشک در مقایسه با فصل‌های مرطوب در برابر تغییرات تبخیرتغرق شدیدتر است. احمدی و همکاران (۲۰۲۳) در بررسی روند ماهانه تبخیرتغرق در ایران گزارش کردند در مناطق خشک و مرکزی ایران به سبب کمیود بارندگی، نیاز آبی گیاهان افزایش یافت که شدت افزایش آن در فصل‌های خشک بیشتر بود.

تعیین تأثیر خشک‌سالی روی الگوی زمانی ماهانه و فصلی تغذیهٔ آبخوان‌ها

نتایج بررسی متغیرهای اقلیمی تحت تأثیر خشک‌سالی (کاهش بارش و جریان‌های سطحی و افزایش دما و تبخیرتغرق) روی افت تغذیهٔ آبخوان‌ها نشان داد در مقیاس ماهانه میان تغییرات متغیرهای اقلیمی تحت خشک‌سالی هواشناسی و آب‌شناختی و تغذیهٔ سفره‌های آب‌زیرزمینی روند معنی‌داری وجود نداشت. فروتن و گلپایگانی (۲۰۲۰) نتایج مشابهی را در بررسی تأثیر متغیرهای اقلیمی روی افت سطح سفره‌های آب زیرزمینی گزارش کردند. در مقیاس فصلی روند افت تغذیهٔ آبخوان در فصل‌های زمستان، بهار و تابستان افزایشی بود که دلیل آن می‌تواند تأثیر کاهش بارش و رواناب و افزایش دما و تبخیرتغرق باشد. بیشترین افت تغذیهٔ آبخوان در فصل تابستان و بهار مشاهده شد که دلیل آن می‌تواند تأثیر افزایشی دما و تبخیرتغرق و برداشت بی‌رویه از این منابع برای مصارف کشاورزی و آب شرب در فصل‌های تابستان و بهار باشد. باراتی و مصلح‌زاده (۲۰۱۹) تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی ایران بررسی کردند و دریافتند که اثر افزایشی دما و کاهش بارندگی بر تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی کاهشی بود و مشکلات کم‌آبی را تشدید کرد. اندازه‌های Z به دست‌آمده با روش MK و اندازه‌های SS برای متغیرهای بارش، رواناب و آب زیرزمینی در جدول ۵ نشان‌داده شده است.

به‌طور کلی، در آبخیز بررسی‌شده، در فصل‌های بارش روند متغیرهای بارش و رواناب کاهشی بود و روند متغیرهای دما و تبخیرتغرق افزایشی بود که این رخداد

باشد. در این راستا بای و همکاران (۲۰۲۳) نتایج مشابهی را از تغییرات فصلی آب‌های زیرزمینی تحت تأثیر عامل‌های اقلیمی و پوشش گیاهی در نواحی خشک گزارش کرده‌اند.

نتایج روندیابی دما روی تغذیهٔ آبخوان‌ها با استفاده از آزمون من-کندال نشان داد در گروه داده‌های دمای ماهانه در سطح اطمینان ۹۵٪، روند معنی‌داری مشاهده نشد. روند دما در تمام فصل‌های سال افزایشی بود، به‌طوری‌که بیشترین افزایش دما در فصل تابستان و کمترین افزایش دما در فصل بهار مشاهده شد. تغییرات افزایش دما از فصل زمستان شروع شد که به نظر می‌رسد سبب کاهش بارش‌های زمستان و شاید جابه‌جایی بارش به فصل بهار شده است که این موضوع نشان‌دهندهٔ ارتباط نزدیک میان متغیرهای دما و بارش است. در این راستا سماواتی و همکاران (۲۰۲۳)، قفوسه و گروسی (۲۰۲۴)، نتایج مشابهی را از تأثیر افزایشی دما در فصل‌های پاییز و تابستان در مقایسه با فصل‌های بهار و زمستان گزارش کرده‌اند. بای و همکاران (۲۰۲۳) دریافتند که افزایش دما و تغییر الگوهای بارندگی به‌طور قابل توجهی بر تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی تأثیرگذار بود و تغذیهٔ آب زیرزمینی را کاهش داد.

نتایج روندیابی تبخیرتغرق روی تغذیهٔ آبخوان‌ها با استفاده از آزمون من-کندال نشان داد در گروه داده‌های تبخیرتغرق ماهانه در سطح اطمینان ۹۵٪، روند معنی‌داری مشاهده نشد. بررسی نتایج نشان داد روند معنی‌داری در سطح ماهانه میان متغیرهای اقلیمی و افت سفره‌های آب زیرزمینی مشاهده نشد. روند تبخیرتغرق در فصل‌های تابستان، بهار و پاییز افزایشی بود. بیشترین روند افزایشی تبخیرتغرق در فصل تابستان (۲۵٪) مشاهده شد که با توجه به کم بودن اندازهٔ بارش و زیاد بودن دما می‌تواند سبب کاهش بیشتر منابع آبخوان شده باشد. کمترین افزایش تبخیرتغرق ۱۰٪ و در فصل بهار مشاهده شد که با توجه به اندازه‌های زیاد بارش و اندازه‌های کم دما، سبب نوسانات کمتری در منابع آبخوان شد. می‌توان گفت روند افزایشی دما و تبخیرتغرق در فصل‌های خشک در مقایسه با فصل‌های مرطوب می‌تواند سبب تشدید اثر

بای و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که تغییرات فصلی در منابع آب زیرزمینی تحت تأثیر عامل‌های اقلیمی و پوشش گیاهی در نواحی خشک بود. این پژوهش نشان داد که روند افزایشی دما و تبخیر-تعرق در فصل‌های خشک در مقایسه با فصل‌های مرطوب، باعث تشدید اثر کمبود آبی (خشک‌سالی) در مناطق خشک و نیمه‌خشک شد. یافته‌های احمدی و همکاران (۲۰۲۳) نیز نشان داد که نیاز آبی گیاهان در فصل‌های خشک به دلیل کمبود بارش افزایش یافت. یافته‌های داوامانی و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که در مناطق نیمه‌خشک، کاهش بارش و افزایش تبخیر-تعرق باعث کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی شد. نتایج پژوهش‌های بای و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که تغییرات در الگوی بارندگی و افزایش دما، منجر به کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی شد. برگویجس و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که با افزایش خشکی، نرخ‌های تغذیه آب‌های زیرزمینی به‌طور چشمگیری تغییر یافت و بر دسترسی به آب‌های زیرزمینی تأثیرگذار بود. اسدی و همکاران (۲۰۲۲) دریافتند که تغییرات بارندگی و افزایش دما باعث کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی شد. لی و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر افزایش دما و تغییر الگوهای بارندگی بر تغذیه آب‌های زیرزمینی را بررسی کردند و گزارش کردند که این عامل‌ها به‌طور قابل توجهی بر تغذیه آب‌های زیرزمینی تأثیرگذار بودند و سبب کاهش آن شدند. یافته‌های این پژوهش با نتایج فروتن و گلپایگانی (۲۰۲۰) که تأثیر متغیرهای اقلیمی بر افت تغذیه آبخوان‌ها را بررسی کردند، هم‌راستا است. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات الگوی زمانی تغذیه آبخوان‌ها تحت تأثیر متغیرهای اقلیمی بود و اندازه این تغییرات بستگی به همبستگی این متغیرها دارد. این یافته‌ها می‌تواند در بهبود برنامه‌ریزی برای مصرف بهینه منابع آب و حفاظت از منابع در مناطق خشک و نیمه‌خشک مؤثر باشد. برای مدیریت پایدار منابع آب در مواجهه با تغییرات اقلیمی، شناسایی دقیق روند تغذیه آبخوان‌ها و استفاده از مدل‌های آب‌شناختی و روش‌های آماری ضروری است.

می‌تواند سبب خشک‌سالی هواشناسی، آب‌شناختی و افت تغذیه آبخوان شده باشد. در پژوهشی هولز و همکاران (۲۰۰۱) گزارش کردند که کمیت آب‌های زیرزمینی تحت تأثیر تغییرات متغیرهای اقلیمی (دوره‌های خشک و مرطوب) تغییر کرد. در این راستا، بای و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغذیه آب‌های زیرزمینی تأیید کردند و افزایش دما و تغییر الگوهای بارندگی را به عنوان ویژگی مؤثر بر کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی معرفی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از مدل آب‌شناختی SWAT و روش‌های آماری مانند آزمون من-کندال، نشان‌دهنده ارتباط نزدیک میان متغیرهای اقلیمی (بارش، دما و تبخیر-تعرق) و روند تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی است.

یافته‌های این پژوهش نشان داد که جریان‌های سطحی بیشترین تأثیر را بر تغذیه آبخوان‌ها داشتند و متغیرهای تبخیر-تعرق، دما و بارش به ترتیب بیشترین اهمیت را در این روند داشتند. همچنین، افزایش دما و تبخیر-تعرق در فصل‌های خشک، خشک‌سالی‌ها را تشدید کرد و در فصل‌های مرطوب نیز تأثیر بیشتری بر بارندگی داشت. در این راستا سماواتی و همکاران (۲۰۲۳) دما و تبخیر-تعرق را به عنوان محرک‌های اصلی خشک‌سالی معرفی کردند. آپیت و همکاران (۲۰۲۳) نیز گزارش کردند افزایش دما و تبخیر-تعرق در فصل‌های خشک، خشک‌سالی‌ها را تشدید کرد و تأثیر بیشتری بر بارندگی در فصل‌های مرطوب داشت. این نتایج با یافته‌های این پژوهش هماهنگی دارد. باراتی و مصلح‌زاده (۲۰۱۹) دریافتند که در مقیاس ماهانه، ارتباط خاصی میان متغیرهای اقلیمی و خشک‌سالی وجود نداشت، اما در مقیاس فصلی، افزایش رخداد خشک‌سالی و افت تغذیه آبخوان‌ها را سبب شد. نتایج پژوهش فورمنتا و پیانوسی (۲۰۲۰) نشان داد که افزایش فراوانی و شدت خشک‌سالی‌ها باعث کاهش قابل توجهی در اندازه تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی شد. یافته‌های تیلر و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان داد که تغییرات اقلیمی بر تغذیه سفره‌های آب‌های زیرزمینی در مقیاس فصلی و منطقه‌ای مؤثر بود.

جدول ۵- اندازه‌های Z به‌دست‌آمده با روش MK و اندازه‌های SS برای متغیرهای بارش، رواناب و آب زیرزمینی.
Table 5- Z values obtained by MK method and SS values for precipitation, runoff and underground water variables.

season	Period	Z(MK)	SS	Period	Z(MK)	SS	Period	Z(MK)	SS
Winter	Precipitation	-0.04	-0.157	Run	-0.17	-0.18	Ground	-0.04	-1.74
Spring		-0.05	-0.34	off	-0.046	-0.275	water	-0.03	-5.43
Summer		-0.15	-0.3		-0.15	-0.21		-0.05	-5.34
Auntum		-0.02	-0.38		-0.074	-0.25		-0.16	-3.83

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تبخیرتعرق به‌ویژه در فصل‌های بارش، منجر به افزایش خشک‌سالی و افت تغذیهٔ آبخوان‌ها شد. روند کاهش بارش و رواناب در فصل‌های مرطوب بیشتر از روند افزایشی دما و تبخیرتعرق در فصل‌های خشک بود. نتایج این پژوهش نشان داد تغییرات الگوی زمانی تغذیهٔ آبخوان‌ها تحت تأثیر متغیرهای گوناگون اقلیمی بود و اندازهٔ این تغییرات بر اساس همبستگی این متغیرها بود. از این نتایج می‌توان در بهبود برنامه‌ریزی برای مصرف بهینه منابع آب و حفاظت از منابع موجود در مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده کرد. مدیریت پایدار منابع آب با شناسایی روند تغذیهٔ آبخوان‌ها و برنامه‌ریزی دقیق در مصرف منابع آبی امکان‌پذیر است. پیشنهاد می‌شود برای بهبود تغذیهٔ آبخوان‌ها و کاهش اثرات خشک‌سالی، برنامه‌ریزی جامع و مدیریت بهینه منابع آب در دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی انجام شود. در دوره‌های ترسالی، می‌توان با ذخیره‌سازی بهینه منابع آب زیرزمینی، بهره‌برداری مؤثری از آب‌ها داشت، در حالی که در دوره‌های خشک‌سالی، باید اقدامات حفاظتی مانند محدود کردن مصرف آب و استفاده از روش‌های مدیریت منابع آب برای کاهش افت تغذیهٔ آبخوان‌ها اجرا شود. همچنین، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و تقویت نظارت و پایش منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ضروری است تا به‌موقع از کاهش غیرمنتظره تغذیهٔ آبخوان‌ها جلوگیری شود.

نتایج این پژوهش نشان داد خشک‌سالی‌های هواشناسی و آب‌شناختی تأثیر چشم‌گیری بر تغذیهٔ سفره‌های آب زیرزمینی دارند و این تأثیر به متغیرهای اقلیمی گوناگون مانند بارش، دما و تبخیرتعرق بستگی دارد. با استفاده از مدل آب‌شناختی SWAT و شاخص‌های پایش خشک‌سالی، مشخص شد که جریان‌های سطحی با همبستگی ۴۵٪ بیشترین تأثیر را بر تغذیهٔ سفره‌های آب زیرزمینی داشتند. تبخیرتعرق، دما و بارش به‌ترتیب با ۳۰٪، ۱۵٪ و ۱۰٪ در درجات بعدی اهمیت بودند. ارتباط میان تغذیهٔ سفره‌های آب زیرزمینی با بارش و جریان‌های سطحی مستقیم بود و با دما و تبخیرتعرق معکوس بود. در سطح ماهانه، متغیرهای اقلیمی ارتباط خاصی با پدیده خشک‌سالی نشان ندادند. اما در فصل‌های گوناگون، کاهش بارش و رواناب و افزایش دما و تبخیرتعرق نشان‌دهندهٔ افزایش رخداد خشک‌سالی در آبخیز بود. افزایش دما در تمام فصل‌ها نشان‌دهندهٔ اهمیت زیاد این متغیر در تشدید خشک‌سالی بود. در مقیاس ماهانه، روند خاصی میان متغیرهای اقلیمی و افت تغذیهٔ آبخوان‌ها مشاهده نشد. اما در فصل‌های زمستان، بهار و تابستان به‌دلیل تغییر نوع بارش و افزایش دما و تبخیرتعرق، روند افت تغذیهٔ آبخوان‌ها افزایشی بود. بیشترین تأثیر افزایش دما و تبخیرتعرق در افت تغذیهٔ آبخوان‌ها در فصل‌های تابستان و بهار مشاهده شد. کاهش بارش و رواناب و افزایش دما و

مشارکت نویسندگان

مهین خسروی: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری و آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله. محمد رضا یزدانی: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش، از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

فهرست منابع

- Abbaspour, K. C. 2011. User manual for SWAT-CUP: SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Eawag: Swiss Fed. Inst. of Aquat. Sci. and Technol., Duebendorf, Switzerland, 103 p.
- Abbaspour KC, Vejdani M, Haghightat S, Yang J. 2007. SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT. In MODSIM 2007 international congress on modeling and simulation, modeling and simulation society of Australia and New Zealand. 10(2): 1596-1602.
- Abdullahi, MG, Toriman ME, Gasim MB. 2015. The application of vertical electrical sounding (VES) for groundwater exploration in Tudun Wada Kano state, Nigeria. Journal of Geology and Geosciences. 4(01): 4-6.
- Achite M, Simsek O, Adarsh S, Hartani T, Caloiero T. 2023. Assessment and monitoring of meteorological and hydrological drought in semiarid regions: The Wadi Ouahrane basin case study (Algeria). Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 130, 103386. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103386>
- Ahmadi Karladani, M, Hezarjaribi, A, Ghorbani, K. 2023. Analysis of the Monthly Trend of Evapotranspiration Changes in Different Climates of Iran. Journal of Climate Research, 1402(53): 81-96.
- Alizadeh M, Yang S, Sharif M, Katti S, McKeown, N, Prabhakar B, Shenker S. 2013. pFabric: Minimal near-optimal datacenter transport. ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 43(4): 435-446. (In Persian).
- Allen DM, Whitfield PH, Werner A. 2010. Groundwater level responses in temperate mountainous terrain: regime classification, and linkages to climate and streamflow. Hydrological Processes. 24(23): 3392-3412.
- Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association. 34(1): 73-89.
- Asadi Zarch MA, Malekinezhad H, Mobin MH, Dastorani MT, Kousari MR. 2011. Drought monitoring by reconnaissance drought index (RDI) in Iran. Water Resources Management. 25: 3485-3504. (In Persian).
- Asadi MA, Jamnezhad F, Ekhtesasi MR, Hosseini SZ. 2022. Investigating the effects of drought and land-use changes on quantity and quality of groundwater resources: A case study of Darab plain. Desert Ecosystem Engineering. 9(28): 89-102. (In Persian).
- Bai Y, Guo Y, Wang H, Wang N, Wei X, Zhou M, ... Zhang Z. 2023. The Impact of Groundwater Burial Depth on the Vegetation of the Dariyabui Oasis in the Central Desert. Sustainability. 16(1): 351-378.
- Bailey RT, Wible TC, Arabi M, Records RM, Ditty J. 2016. Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater-surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. Hydrological Processes. 30(23): 4420-4433.
- Banimahd SA, Khalili D. 2013. Factors influencing Markov chains predictability characteristics, utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI drought indices in different climatic zones. Water resources management, 27: 3911-3928.
- Barker LJ, Hannaford J, Chiverton A, Svensson C. 2016. From meteorological to hydrological drought using standardised indicators. Hydrology and Earth System Sciences. 20(6): 2483-2505.
- Barman J, Biswas B, Soren DDL. 2023. Groundwater trend analysis and regional groundwater drought assessment of a semi-arid

region of Rajasthan, India. *Environment, Development and Sustainability*. pp. 1-25.

Barati R, Mesbahzadeh N. 2019. Evaluating the impact of climate change on groundwater resources in the Middle East: A case study from Iran. *Journal of Climate Change and Water Resources*. 15(3): 210-225.

Bazrafshan O, Mahmoudzadeh F, Asgarinezhad A, Bazrafshan J, Author - Corresponding, Professor A. 2019. Adaptive evaluation of SPI, RDI, and SPEI indices in analyzing the trend of intensity, duration, and frequency of drought in Arid and Semi-Arid Regions of Iran. *Irrigation Sciences and Engineering*. 42(3):117-131. <https://doi.org/10.22055/jise.2017.22113.1585>

Berghuijs WR, Van den Hurk BJM. 2024. Impacts of increasing drought on groundwater recharge rates: a global assessment. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. pp. 1-31.

Bloomfield JP, Marchant BP. 2013. Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences*. 17(12): 4769-4787.

Boudad N, Faizi R, Thami ROH, Chiheb R. 2018. Sentiment analysis in Arabic: A review of the literature. *Ain Shams Engineering Journal*. 9(4): 2479-2490.

Bouwer H. 2000. Integrated water management: emerging issues and challenges. *Agricultural Water Management*. 45(3): 217-228.

Bucton BGB, Shrestha S, Saurav KC, Mohanasundaram S, Viridis SG, Chaowiwat W. 2022. Impacts of climate and land use change on groundwater recharge under shared socioeconomic pathways: A case of Siem Reap, Cambodia. *Environmental Research*, 211, 113070. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113070>

Busico G, Ntona MM, Carvalho SC, Patrikaki O, Voudouris K, Kazakis N. 2021. Simulating future groundwater recharge in coastal and inland catchments. *Water Resources Management*. 35(11): 3617-3632.

Davamani V, John JE, Poornachandhra C, Gopalakrishnan B, Arulmani S, Parameswari E, ... Naidu R. 2024. A Critical Review of Climate Change Impacts on Groundwater Resources: A Focus on the Current Status, Future Possibilities, and Role of Simulation Models. *Atmosphere*. 15(1): 115-122.

Faquseh H, Grossi G. 2024. Trend analysis of precipitation, temperature and snow water equivalent in Lombardy region, northern Italy. *Sustainable Water Resources Management*.

10(1): 1-14. <https://doi.org/10.1007/s40899-023-00992-2>

Forootan E, Golpaegani F. 2020. The Investigation of the relationship between groundwater level variation and drought index (Case study: Sharifabad Watershed in Qom Province). *Journal of Environmental Science and Technology*. 22 (596): 255-265 (In Persian).

Hachemaoui A, Elouissi A, Benzater B, Fellah S. 2022. Assessment of the hydrological impact of land use/cover changes in a semi-arid basin using the SWAT model (case of the Oued Saïda basin in western Algeria). *Modeling Earth Systems and Environment*. 8(4): 5611-5624.

Hersi NA, Mulungu DM, Nobert J. 2023. Groundwater recharge estimation under changing climate and land use scenarios in a data-scarce Bahi (Manyoni) catchment in Internal Drainage Basin (IDB), Tanzania using Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Groundwater for Sustainable Development*, 22(1), 100921-100957. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100957>

Jahangir MH, Yarahmadi Y. 2020. Hydrological drought analysis and monitoring by using the Streamflow Drought Index (SDI) (case study: Lorestan, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 13: 1-12.

Jia X, Hou D, Wang L, O'Connor D, Luo J. 2020. The development of groundwater research in the past 40 years: A burgeoning trend in groundwater depletion and sustainable management. *Journal of Hydrology*, 587, 125006. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125006>

Katipoğlu OM, Acar R, Şengül S. 2020. Comparison of meteorological indices for drought monitoring and evaluating: a case study from Euphrates basin, Turkey. *Journal of Water and Climate Change*. 11(S1): 29-43.

Khosravi M, Zolfaghari AA, Kabuli SH, Ghaffari H. 2022. Investigating the efficiency of the SWAT model in spatial runoff analysis in watersheds lacking local soil data (Case study: Damghanroud Watershed). *Applied Soil Research*. 10 (1): 129-143. (In Persian).

Li X, Wang J, Zhao Y. 2022. Assessment and Prediction of Groundwater using Geospatial Techniques. *Research Square*. Res. 48: 241-249. <https://www.researchsquare.com/article/rs-878665/v1>

Mann H. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13 245-259. Millly PCD, Dunne KA (2002) Macro scale water fluxes 2, water and energy supply control of their inter-annual variability. *Water Research*. 38(1): 241-249.

- Masupha MD, Machacha G. 2021. Evaluating the impact of climate change on groundwater recharge in Semi-Arid Regions: A case study of the Limpopo River Basin, South Africa. *Journal of Hydrology*. 590, pp. 125-138.
- Mengistu TD, Chung IM, Kim MG, Chang SW, Lee JE. 2022. Impacts and implications of land use land cover dynamics on groundwater recharge and surface runoff in East African Watershed. *Water*. 14(13): 2068.
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. 17(22): 179-183.
- Moccia B, Mineo C, Ridolfi E, Russo F, Napolitano F. 2022. SPI-based drought classification in Italy: influence of different probability distribution functions. *Water*. 14(22): 3659-3668.
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 50(3): 885-900.
- Moeck C, Brunner P, Hunkeler D. 2016. The influence of model structure on groundwater recharge rates in climate-change impact studies. *Hydrogeology Journal*. 24(5): 1169-1171.
- Muleta B, Seyoum T, Assefa S. 2022. GIS-based assessment of suitability area of rainwater harvesting in Daro Labu District, Oromia, Ethiopia. *American Journal of Water Science and Engineering*, 8(1): 21-35.
- Nalbantis I, Tsakiris G. 2009. Assessment of hydrological drought revisited. *Water resources management*. 23: 881-897.
- Ndayiragije JM, Li F. 2022. Monitoring and analysis of drought characteristics based on climate change in Burundi using standardized precipitation evapotranspiration index. *Water*. 14(16): 2494-2511.
- Noori AR, Singh SK. 2024. Delineation of optimal locations for artificial groundwater recharge utilizing MIF and GIS in a semi-arid area. *Environmental Earth Sciences*. 83(1): 1-15. <https://doi.org/10.1007/S12665-023-11338-8/METRICS>
- Petersen-Perlman JD, Aguilar-Barajas I, Megdal, SB. 2022. Drought and groundwater management: Interconnections, challenges, and policy responses. *Current Opinion in Environmental Science and Health*. 28(1): 100349-100364.
- Pingale SM, Khare D, Jat MK, Adamowski J. 2016. Trend analysis of climatic variables in an arid and semi-arid region of the Ajmer District, Rajasthan, India. *Journal of Water and Land Development*. 28(1): 3-15.
- Rahimeh Javadian MN. 2018. Study of thermal comfort in adaptation of architecture to climatic conditions in Semnan city. *Journal of Application of Geographic Information Systems and Remote Sensing in Urban Planning*. 1(12): 74-92. (In Persian).
- Quinn NW, Oster JD. 2021. Innovations in Sustainable Groundwater and Salinity Management in California's San Joaquin Valley. *Sustainability*, 13(12): 6649-6658.
- Rwebugisa RA. 2008. Groundwater recharge assessment in the Makutupora basin, Dodoma Tanzania. *ITC*. 15(1):10-25.
- Sahu MK, Shwetha HR, Dwarakish GS. 2023. State-of-the-art hydrological models and application of the HEC-HMS model: A review. *Modeling Earth Systems and Environment*. 9(3): 3029-3051.
- Shah BA, Chatterjee S. 2021. Geospatial assessment of groundwater arsenic contamination in the Holocene aquifers of Bengal Delta from western parts of the Bhagirathi River in West Bengal, India. *Arabian Journal of Geosciences*. 14: 1-14.
- Said M, Hyandye C, Mjemah IC, Komakech HC, Munishi LK. 2021. Evaluation and prediction of the impacts of land cover change on hydrological processes in data constrained Southern slopes of Kilimanjaro, Tanzania. *Earth*. 2(2): 225-247.
- Samavati A, Babamiri O, Rezai Y, Heidarimozaffar M. 2023. Investigating the effects of climate change on future hydrological drought in mountainous basins using SWAT model based on CMIP5 model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 37(3): 849-875. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02319-7>
- Sandström K. 1995. Modeling the effects of rainfall variability on groundwater recharge in semi-arid Tanzania. *Hydrology Research*. 26(4-5): 313-330.
- Sen PK. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*. 63(324): 1379-1389.
- Sivapragasam C, Kannabiran K, Karthik G, Raja S. 2015. Assessing Suitability of GP Modeling for Groundwater Level. *Aquatic Procedia*. 4 (December). pp. 693-699. <https://doi.org/10.1016/j.agpro.2015.02.089>
- Tareke KA, Awoke AG. 2022. Hydrological drought analysis using streamflow drought index (SDI) in Ethiopia. *Advances in Meteorology*. 2022(1): 7067900-7067951.
- Taylor RG, Scanlon B, Döll P, Rodell M, Van

Beek R, Wada Y, Treidel H. 2013. Ground water and climate change. *Nature Climate Change*. 3(4): 322-329.

Tigabu TB, Wagner PD, Hörmann G, Fohrer N. 2020. Modeling the spatio-temporal flow dynamics of groundwater-surface water interactions of the Lake Tana Basin, Upper Blue Nile, Ethiopia. *Hydrology Research*. 51(6): 1537-1559.

Tsakiris G, Vangelis HJEW. 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*. 9(10): 3-11.

Tularam GA, Krishna M. 2009. Long term consequences of groundwater pumping in Australia: A review of impacts around the globe. *Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation*, 4(2): 15-25.

Twisa S, Kazumba S, Kurian M, Buchroithner M. F. 2020. Evaluating and predicting the effects of land use changes on hydrology in Wami river basin, Tanzania. *Hydrology*. 7(1): 5-17.

Wang Y, Zheng C, Ma R. 2018. Safe and sustainable groundwater supply in China. *Hydrogeology Journal*. (5): 1301-1324.

Wang Y, Zhu S, Yuan L, Deng R. 2020. An automatic parameter calibration method for the SWAT model in runoff simulation. *River Research and Applications*. 36(7): 1321-1333.

Wambua RM. 2019. Hydrological drought forecasting using modified surface water supply

index (SWSI) and streamflow drought index (SDI) in conjunction with artificial neural networks (ANNs). *International Journal of Service Science, Management, Engineering and Technology (IJSSMET)*. 10(4): 39-57.

Wubneh MA, Alemu MG, Fekadie FT, Worku TA, Demamu MT, Aman TF. 2023. Meteorological and hydrological drought monitoring and trend analysis for selected gauged watersheds in the Lake Tana basin, Ethiopia: under future climate change impact scenario. *Scientific African*, 20, e01738. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01738>

Wu F, Zhan J, Chen J, He C, Zhang Q. 2015. Water yield variation due to forestry change in the head-water area of Heihe River Basin, northwest China. *Advances in Meteorology*. 2015(1): 786764. <https://doi.org/10.1155/2015/786764>

Yilmaz B. 2019. Analysis of hydrological drought trends in the GAP region (southeastern Turkey) by Mann-Kendall test and innovative sen method. *Applied Ecology and Environmental Research*. 17(2):57-67. https://doi.org/10.15666/aer/1702_33253342

Zarei AR, Shabani A, Mahmoudi MR. 2021. Susceptibility assessment of winter wheat, barley and rapeseed to drought using generalized estimating equations and cross-correlation function. *Environmental Processes*. 8: 163-197. (In Persian).



Evaluating the Effect of Drought on the Temporal Recharge Pattern of Aquifers in the Damghanroud Watershed

Mahain Khosravi¹, **Mohammad Reza Yazdani^{*2}**

1- Postdoc researcher, Department of Combat Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran

2- Department of Combat Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Groundwater is considered one of the most important sources for agriculture and drinking water supply, and it is significantly affected by environmental and climatic factors. Our limited understanding of hydrological processes, particularly groundwater resource, makes understanding the metrics and patterns affecting groundwater recharge essential for the optimize water resource management. Examining the temporal patterns of groundwater recharge provides a foundation for sustainable management of groundwater resources to mitigate the effects of drought on water supplies.

Materials and Methods

This study quantifies groundwater recharge from 2008 to 2018 using the SWAT model in the Damghanroud watershed located in Semnan Province. Calibration and validation of the model were performed using SWATCUP and the SUFI2 algorithm. The standardized precipitation index (SPI), the reconnaissance drought index (RDI), and the standardized runoff index (SRI) were used to assess the impacts of drought on aquifer recharge. The trend of aquifer recharge was analyzed using the Mann-Kendall non-parametric test and Sen's slope estimator method.

Results and Discussion

The analysis of the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient during the calibration (0.77) and validation (0.69) periods in the SWAT model showed that the model's performance in simulation groundwater was relatively good. The findings revealed that, on a monthly scale, the effects of drought on aquifer recharge did not show a specific trend; however, in the winter, spring, and summer seasons, there was an increasing trend in the decline of aquifer recharge. Reduced rainfall and runoff, coupled with increased temperature and evapotranspiration during rainy seasons, intensified drought conditions, leading to decreased groundwater recharge.

Conclusion and suggestions

Temporal analysis of aquifers revealed that in arid and semi-arid regions, climatic variable changes are closely linked with drought phenomena.

Article Type: Research Article

***Corresponding Author E-mail:** m_yazdani@semnan.ac.ir

Citation: Khosravi, M., Yazdani, M.R. 2025. Evaluating the effect of drought on the temporal pattern of groundwater recharge in Damghanroud Watershed. Watershed Management Research. 38(1): 38-60.

DOI: 10.22092/wmrj.2024.365662.1585

Received: 05 May 2024, **Received in revised form:** 29 May 2024, **Accepted:** 21 September 2024

Published online: 21 March 2025

Watershed Management Research, Vol.38, No.1, Ser. No:146, Spring 2025, pp. 38-60.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center

©Author(s)



The results of this study show that the temporal pattern of aquifer recharge changed under the influence of various variable changes in the watershed, and the magnitude of these changes was based on the correlation of the variables. The trend analysis of droughts on aquifer recharge showed an increasing trend during wet periods and a decreasing trend during dry periods. These findings can be used to improve aquifer recharge during wet periods and to mitigate the effects of droughts on aquifer recharge through optimal management and planning of existing water resources. It is recommended to implement comprehensive planning and optimal management of water resources during both wet and dry periods to improve groundwater recharge and mitigate the effects of drought. Additionally, using climate change prediction models and strengthening monitoring of groundwater resources in arid and semi-arid areas is essential to prevent unexpected reductions in aquifer recharge in a timely manner.

Keywords: Groundwater, Mann-Kendall test, Drought index, SWAT model

Article Type: Research Article

Conflicts of interest

The authors of this article declare that they have no conflicts of interest regarding the writing and publication of the content and results of this research.

Data Availability Statement

The data and results used in this research will be made available upon request through correspondence with the corresponding author.

Authors' Contribution

Mahin Khosravi: Writing - original draft preparation

Mohammad Reza Yazdani: Resources, Software, Manuscript editing



مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

تأثیر تغییرات سنجه‌های اقلیمی بر تحرک و پایداری تپه‌های ماسه‌ای در آبخیز دریاچه ارومیه، ایستگاه مهاباد

احمد نجفی ایگدیر^{۱*}، علیرضا مجیدی^۲

- ۱- استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران
- ۲- استادیار بخش تحقیقات هیدرولوژی و توسعه منابع آب، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

تپه‌های ماسه‌ای با ساختار منحصر به فردی که دارند می‌توانند متحرک یا ثابت باشند که عامل اصلی پایداری آنها، وجود پوشش گیاهی است. ویژگی خاص تپه‌های ماسه‌ای و رسانایی هیدرولیکی زیاد آنها باعث افزایش سرعت نفوذ آب باران می‌شود. با خشکی ذرات ماسه و از بین رفتن انسجام میان دانه‌ها، پوشش گیاهی ضعیف و فرسایش بادی را در پی خواهد داشت. با توجه به حاکم شدن شرایط جدید اقلیمی در حوزه‌های حاشیه دریاچه ارومیه، هدف این پژوهش، شناسایی و بررسی تپه‌های ماسه‌ای جدید و روند حرکتی آنها در این نواحی است. بنابراین، به دلیل نبودن تپه‌های ماسه‌ای و شکل‌گیری نشدن آنها در سطح استان فقط ایستگاه هواشناسی مهاباد از نظر وضعیت باد و شاخص لنکستر بررسی شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، برای بررسی اثر تغییرات اقلیم (باد و بارش) بر فعالیت ماسه‌ها و به‌منظور پیش‌بینی احتمال تحرک تپه‌های ماسه‌ای و ماسه‌زارها و گرد و غبار ناشی از آنها، از روش جهانی لنکستر استفاده شد. بر اساس شاخص لنکستر رابطه میان تحرک ماسه و متغیرهای اقلیمی مدل‌سازی شد. سپس، ذرات شن و ماسه به‌دنبال بادهای با سرعت بیشتر از آستانه فرسایش حرکت می‌کنند که با بارش مؤثر رابطه معکوس دارد. از این رو، داده‌های لازم شامل آمار بارش، دما، باد و رطوبت نسبی ایستگاه مهاباد از اداره کل هواشناسی استان تهیه شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Homanh45@gmail.com

استناد: نجفی ایگدیر، ا.، مجیدی، ع. ۱۴۰۳. تأثیر تغییرات سنجه‌های اقلیمی بر تحرک و پایداری تپه‌های ماسه‌ای در آبخیز دریاچه ارومیه، ایستگاه مهاباد. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۸ (۱): ۷۷-۶۱.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2024.364663.1568

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۴، دوره ۳۸، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۴۶، بهار ۱۴۰۴، صفحه‌های ۶۱ تا ۷۷.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



همچنین، به‌منظور تعیین سال‌های خشک و تر و اثرات آن بر افزایش یا کاهش روزهای همراه با گرد و غبار، از شاخص SPEI استفاده شد. تبخیر و تعرق بالقوه، فراوانی و تداوم رخداد پدیده خشکسالی‌های هواشناسی با استفاده از شاخص SPEI محاسبه شد. برای تعیین وضعیت اقلیمی و خطر بیابان‌زایی، از شاخص خشکی (AI) استفاده شد. بر اساس اندازه‌های بارش و تبخیر و تعرق بالقوه، شاخص خشکی با استفاده از روش تورنت وایت محاسبه شد و بر مبنای تقسیم‌بندی شاخص یونپ (UNEP) وضعیت بیابان‌زایی منطقه مشخص شد. این شاخص ابزاری مؤثر برای تعیین وضعیت اقلیمی و خطر بیابان‌زایی مناطق گوناگون است.

نتایج و بحث

در این پژوهش، با استفاده از شاخص SPEI، داده‌های تبخیر و تعرق بالقوه، فراوانی و تداوم رخداد پدیده خشکسالی‌های هواشناسی تهیه شد. نتایج نشان داد که مجموع تبخیر و تعرق بالقوه در ایستگاه مهاباد ۷۵۵/۹۸ میلی‌متر در سال بود که روند آن افزایشی بود. همچنین، ۸۴٪ از بادهای ثبت‌شده در این ایستگاه سرعت کمتر از ۶ متر در ثانیه داشتند. در این میان، تمرکز شدیدترین بادهای مشاهده‌شده در ماه‌های (Mar)، (Feb) و (Apr) به ترتیب ۱۲/۱، ۱۱/۲ و ۱۰/۱٪ بود. همچنین، ۲۷٪ از بادهای غالب سرعت ۶ تا ۱۰ متر در ثانیه داشتند و کمتر از ۱٪ از بادهای غالب نیز سرعت ۱۰ تا ۱۲ متر در ثانیه داشتند. براساس شاخص لنکستر تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای موجود در منطقه، در بازه زمانی ۳۳ سال کمتر از ۵۰ بود و وضعیت آنها غیرفعال بود. رابطه میان شاخص لنکستر با درصد بادهای بیشتر از آستانه فرسایش و اندازه تبخیر و تعرق مستقیم بود اما، با اندازه بارش برعکس بود. در منطقه مهاباد، آهنگ تغییرات شاخص لنکستر نسبت به افزایش یا کاهش درصد بادهای با سرعت بیشتر از حد آستانه فرسایش، به یک اندازه بود. تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای تابعی از تغییرات تبخیر و تعرق بالقوه منطقه بوده و با آن رابطه مستقیم دارد. بنابراین، با افزایش تبخیر و تعرق بالقوه، تحرک‌پذیری نیز افزایش می‌یابد. شاخص خشکی به‌دست آمده مطابق با تقسیم‌بندی ارائه شده در یونپ (UNEP)، نشان داد که تمام ایستگاه‌های هواشناسی استان در وضعیت نیمه‌خشک تا مرطوب هستند. بر این اساس منطقه مهاباد با خطر متوسط بیابان‌زایی و نیمه‌مرطوب مواجه است که خطر بیابان‌زایی آن را تهدید می‌کند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با بررسی‌های انجام شده در سطح استان آذربایجان غربی، مناطقی که تپه‌های ماسه‌ای شاخصی داشته باشند و یا در حال تشکیل باشند، تاکنون گزارش نشده است. ولی در بازدیدهای انجام‌شده از ساحل دریاچه ارومیه و در محدوده شهرستان مهاباد، نشانه‌های کوچکی از شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای دیده شد که یک سال بعد به دلیل قرار گرفتن در محدوده تغییرات سالانه سطح آب دریاچه و جریان آب از اطراف ساحل از بین رفتند. در این پژوهش، ضمن شناخت روند تغییرات عناصر اقلیمی و همبستگی موجود میان این عوامل به‌عنوان متغیرهای مستقل، اثرات احتمالی تغییر اقلیم بر پدیده گرد و غبار و تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای موجود نیز بررسی شد. در تمام سال‌های آماری، تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای موجود در منطقه کمتر از ۵۰ بود و شاخص لنکستر به‌دست آمده برای ایستگاه همدید مهاباد، وضعیت غیرفعال را نشان داد. همچنین، براساس تحلیل حساسیت شاخص لنکستر، کاهش تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای با کاهش اندازه تبخیر و تعرق بالقوه بیشتر از نرخ افزایش آن در حالت افزایش تبخیر و تعرق بالقوه بود. بر مبنای تقسیم‌بندی شاخص یونپ (UNEP)، منطقه مهاباد با شاخص خشکی نیمه‌مرطوب و با کمترین اندازه تبخیر و تعرق، با خطر متوسط بیابان‌زایی مواجه است. از این‌رو، با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی حاکم، توصیه می‌شود در استفاده از زمین بسیار دقت شود و از روش‌های بهینه آبیاری در کشاورزی استفاده شود.

واژگان کلیدی: تپه‌های ماسه‌ای، تغییر اقلیم، شاخص استاندارد بارش-تبخیر و تعرق بالقوه، شاخص لنکستر

مقدمه

در دنیا تپه‌های ماسه‌ای به شکل فعال، نیمه‌فعال و یا غیرفعال (تثبیت‌شده به وسیله پوشش گیاهی) هستند. تپه‌های ماسه‌ای تثبیت‌شده بیانگر وجود اقلیم خشک در گذشته است که شرایط فعالی داشته‌اند. بسیاری از زمین‌شناسان و زمین‌ریخت‌شناسان تحرک تپه‌های ماسه‌ای در طول کواترنر فوقانی را به افزایش خشکی مرتبط می‌دانند، در حالی که پایداری به وسیله پوشش گیاهی در طول دوره‌های مرطوب رخ می‌دهد (سارنتین ۱۹۷۸). مفهوم تشکیل تپه‌های شنی فعال در شرایط خشک و تثبیت طبیعی در طول دوره‌های مرطوب، مبتنی بر تعامل شناخته‌شده دما با بارش به‌عنوان یک عامل تعیین‌کننده میانگین تولید خالص سالانه زیست توده اولیه است (لاونرو ۱۹۷۹). بدیهی است که تمام تپه‌های شنی ثابت، در گذشته فعال بوده‌اند و با تغییر آب و هوا تثبیت شده‌اند. اکثر دانشمندان از تغییر آب و هوا به‌عنوان تغییر در اندازه بارندگی و دما یاد می‌کنند. دما و بارش دو عنصر مهم آب و هوایی هستند که بر رشد پوشش گیاهی تأثیر می‌گذارند (هوتن و همکاران ۲۰۰۱). بنابراین، انتظار می‌رود تپه‌های ماسه‌ای در بیابان‌های گرم که بدون پوشش گیاهی هستند فعال باشند، در حالی که تپه‌های کنار ساحل که رطوبت و عموماً پوشش گیاهی دارند، تثبیت شده باشند. با این حال، نمونه‌های زیادی از تپه‌های شنی فعال در مناطق مرطوب (هانترو و همکاران ۱۹۸۳)، و تپه‌های تثبیت‌شده در مناطق خشک (سور و همکاران ۲۰۲۰) وجود دارد. هدف این پژوهش، تبیین پدیده تپه‌های ماسه‌ای فعال در مناطق مرطوب و شن‌های تثبیت‌شده در اقلیم‌های خشک و تبیین تأثیر تغییر اقلیم بر تحرک و پایداری تپه‌های ماسه‌ای بود. در بخش‌های مختلف جهان، شاخص‌های گوناگونی از فرسایش بادی و تحرک تپه‌های ماسه‌ای بررسی شده است که همه آنها بر اساس دو عامل، تحرک تپه‌های ماسه‌ای را کاهش یا افزایش می‌دهند (شپل و همکاران ۱۹۶۲). عامل اول، درجه بادخیزی است (W) که به شکل درصد سالانه روزهایی که سرعت باد بیشتر از سرعت حد آستانه حرکت شن و ماسه است، بیان می‌شود. در صورت افزایش وزش باد،

بیشتر تپه‌های شنی فعال خواهند شد. عامل دوم که به رشد پوشش گیاهی کمک می‌کند، نسبت میان میانگین سالانه بارندگی (P) و تبخیر بالقوه سالانه (PET) است. به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر تحرک‌پذیری ماسه‌ها، لنکستر (۱۹۸۸) روش خود را ارائه داد که بر اساس متغیرهای باد و تبخیر و تعرق بالقوه بود. در آفریقای جنوبی، اندازه‌های بحرانی این شاخص برای تپه‌های شنی کاملاً فعال و بدون پوشش گیاهی، بیش از ۲۰۰ بود و برای تپه‌های شنی گیاهی غیرفعال، کمتر از ۵۰ بود. این شاخص (M) به‌طور گسترده‌ای به وسیله زمین‌شناسان و زمین‌ریخت‌شناسان برای تعیین فعال یا ثابت بودن تپه‌های شنی و تأثیر قابل انتظار تغییرات آب و هوا بر میدان‌های تپه‌ای استفاده شده است (مک‌تینش ۱۹۹۰).

در ایران نصرتی (۲۰۱۴) در ۴۱ ایستگاه هواشناسی همدید در گستره اقلیم‌های گوناگون، خشک‌سالی هواشناسی را با استفاده از شاخص بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده SPEI و مقایسه آن با شاخص بارش استاندارد شده SPI، بررسی کرد. نتایج این پژوهشگر نشان داد، همبستگی شاخص بارش استاندارد شده و شاخص بارش تبخیر و تعرق استاندارد شده، معنی‌دار بود. اما، شاخص بارش تبخیر و تعرق استاندارد شده پاسخ سریع‌تری نسبت به خشک‌سالی نشان داد. همچنین، او گزارش کرد که با افزایش مقیاس زمانی، تداوم خشک‌سالی نیز افزایش یافته است. با توجه به اهمیت تبخیر و تعرق در بیلان آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، شاخص بارش تبخیر و تعرق استاندارد شده می‌تواند شاخص مناسبی در پژوهش‌های خشک‌سالی باشد. نعیمی و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی تأثیر تغییر اقلیم بر تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای در شهرستان سبزوار را بررسی کردند. این پژوهشگران دریافتند که بر اساس شاخص خشکی یونپ، ۷۵٪ از تغییرات سطح زمین و تحرک تپه‌های ماسه‌ای، به دلیل تغییر عناصر اقلیمی و به‌طور ویژه تغییرات بارندگی، بادهای فرساینده، سرعت باد و تبخیر و تعرق بالقوه منطقه بود. همچنین، در دوره آماری بررسی شده اندازه‌های شاخص لنکستر در ایستگاه نامبرده بیانگر

خسارت‌های ناشی از فعالیت تپه‌های ماسه‌ای در این شهرستان بسیار ضروری است. همچنین، نتایج پیش بینی اثرات تغییر احتمالی عامل‌های اقلیمی بر تحرک پذیری ماسه‌های روان در ایستگاه منتخب استان سمنان به وسیله این پژوهشگران، نشان داد که حساسیت تحرک‌پذیری ماسه نسبت به تغییرات افزایشی باران بیشتر از سرعت باد و نسبت به تغییرات کاهش باران کمتر از سرعت باد بود. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که اگر اندازه‌های میانگین سرعت باد 20% در آینده کاهش یابد و یا اندازه بارندگی به اندازه 20% افزایش یابد، وضعیت تپه‌ها از حالت کاملاً فعال به فعال تغییر خواهند کرد.

استان آذربایجان غربی در شمال غرب ایران و در منطقه نیمه خشک است و از نظر اقلیمی وجود تپه‌های ماسه‌ای در آن قابل انتظار نیست و می‌توان گفت که تمام پژوهش‌ها و بررسی‌هایی که در این زمینه انجام شده است در مناطق خشک بوده است. ولی با توجه به شرایط خشکی و کم بارشی که اخیراً حاکم شده شرایط تغییر یافته است. با کاهش بارش و کاهش ورودی رودها، دریاچه ارومیه به خشکی گراییده و مناطق خشک وسیع و گسترده در سواحل آن نمایان شده است. بنابراین، امکان تشکیل ماسه خشک و روان و به تبع آن ایجاد تپه ماسه‌ای در محدوده دریاچه و سواحل آن دور از انتظار نیست. با توجه به حاکم شدن شرایط جدید اقلیمی در منطقه، شناسایی و بررسی تپه‌های ماسه‌ای جدید و روند حرکتی آنها از اهداف پژوهش می‌باشد. بنابراین، به دلیل نبودن تپه‌های ماسه‌ای و شکل‌گیری نشدن آنها در سطح استان و در ساحل دریاچه ارومیه (با چشم‌انداز ساحل گسترده و کم شیب)، فقط ایستگاه هواشناسی مهاباد از نظر وضعیت باد و شاخص لنکستر وجود تپه ماسه‌ای بررسی شد.

مواد و روش‌ها

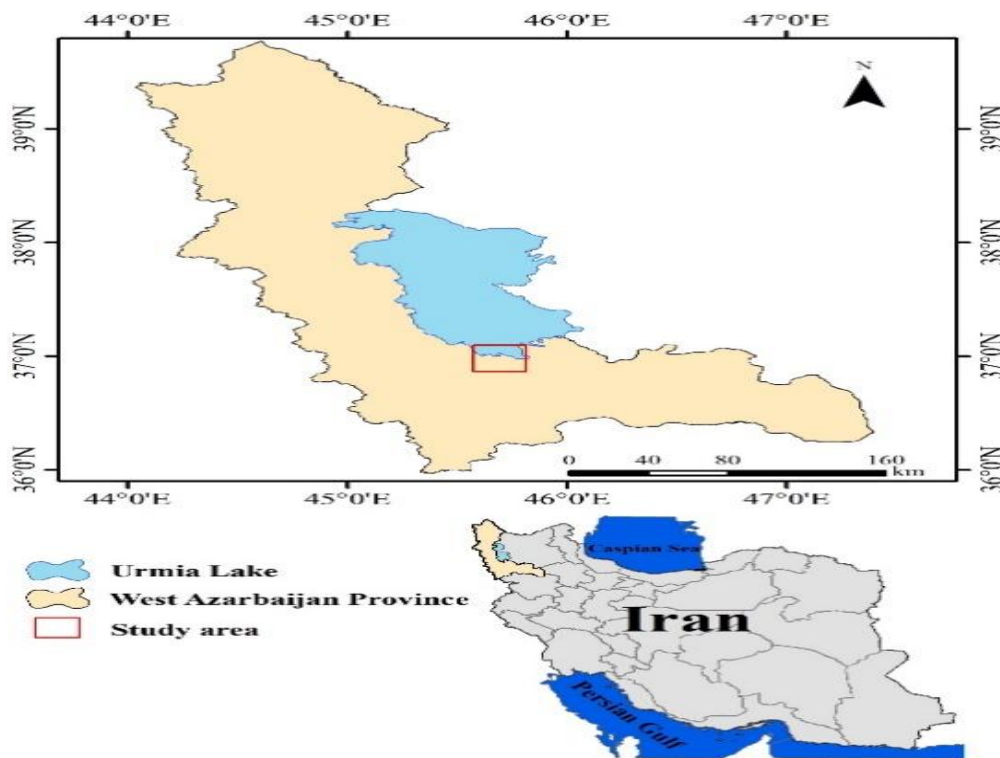
منطقه مطالعه شده

استان آذربایجان غربی با در نظر گرفتن وسعت دریاچه ارومیه، 43660 کیلومتر مربع مساحت دارد. این استان که در شمال غرب ایران است، $2/65\%$ از مساحت کل

وضعیت غیرفعال نبود. در نهایت، نتیجه گرفتند که رابطه میان شاخص خشکی و تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای نشانگر تأثیر معنی‌دار خشکی بر اندازه تحرک و فعالیت تپه‌های ماسه‌ای بود. در پژوهش فوق، نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که با افزایش فراوانی بادهای فرساینده و تبخیر تعرق بالقوه به اندازه 30% ، فعالیت تپه‌های ماسه‌ای در ایستگاه سبزوار 38% افزایش خواهد یافت. در استان بوشهر در منطقه دیر، نتایج پژوهش راهی و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که اندازه فعالیت تپه‌های ماسه‌ای بر پایه شاخص لنکستر در دوره آماری ۳۰ ساله کاملاً فعال بود و بر اساس شاخص خشکی منطقه مطالعه شده در سه طبقه فراخشک، خشک و نیمه خشک و در وضعیت خطر بیابان‌زایی واقعی، بسیار شدید و شدید بود. در پژوهش فوق، بر اساس آزمون تحلیل حساسیت، مشخص شد، چنانچه چنانچه در آینده فراوانی بادهای با سرعت بیش از حد آستانه فرسایش در منطقه دیر، 30% افزایش یابد، فعالیت و حرکت تپه‌های ماسه‌ای نیز 30% افزایش خواهد یافت، در حالی که با 30% افزایش بارندگی، 23% فعالیت تپه‌های ماسه‌ای کاهش خواهد یافت. در کویر سیرجان، حنیفه‌پور و همکاران (۲۰۲۲)، عامل‌های اقلیمی مؤثر بر تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای را با استفاده از شاخص لنکستر، پایش و پیش‌بینی کردند و نتیجه گرفتند که وضعیت بیشتر تپه‌های ماسه‌ای فعال بود و 90% از سال‌های آماری از نظر اقلیمی در وضعیت خطر بیابان‌زایی خیلی شدید بود و 65% از افزایش فعالیت رسوبات بادی نیز به دلیل تغییر شرایط اقلیمی ناشی از تغییرات بارندگی و تبخیر و تعرق بالقوه در منطقه مطالعه شده بود. این پژوهشگران پیش‌بینی کردند که تغییر هم‌زمان عناصر اقلیمی به‌ویژه سرعت بادهای فرسایش‌زا و تبخیر و تعرق در آینده می‌تواند بر شدت بیابان‌زایی در این منطقه از کشور، تأثیرگذار باشد. در استان سمنان و در شهرستان دامغان، یوسفی‌میرهن و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیقی بر اساس نتایج به‌دست آمده از شاخص لنکستر، گزارش کردند که با بیشترین شاخص، وضعیت فعالیت رسوبات بادی در این شهرستان، کاملاً فعال بود. از این‌رو، اقدام برای کاهش

۱، نشان داده شده است. با توجه به گستردگی و کم‌شیب بودن ساحل دریاچه ارومیه و فراوانی بیشتر رخدادهای گرد و غبار در ایستگاه مهاباد، این پژوهش در محدوده شهرستان مهاباد انجام شد.

کشور را در بر می‌گیرد. استان آذربایجان غربی از طرف شمال و شمال شرق با جمهوری آذربایجان و ارمنستان، از غرب با کشورهای ترکیه و عراق، از جنوب با استان کردستان و از شرق با استان آذربایجان شرقی و زنجان همسایه است. موقعیت استان آذربایجان غربی در شکل



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعه شده.
Figure 1- Location of the study area.

پیش‌بینی احتمال تحرک تپه‌های ماسه‌ای و ماسه‌زارها و گرد و غبار ناشی از آنها، از روش جهانی لنگستر استفاده شد. همچنین، برای شناخت وضعیت بیابان‌زایی منطقه نیز از شاخص یونپ (UNEP)، استفاده شد. از این رو، داده‌های لازم شامل آمار بارش، دما، باد، رطوبت نسبی و تبخیر و تعرق ایستگاه مهاباد از اداره کل هواشناسی استان جمع‌آوری شد.

روش پژوهش

بررسی تبخیر و تعرق بالقوه و خشک‌سالی‌ها به‌منظور تعیین سال‌های خشک و تر و بررسی اثرات آن بر افزایش یا کاهش روزهای همراه با گرد و غبار، از شاخص SPEI استفاده شد. با توجه به اینکه در شاخص SPEI افزون بر بارش، تبخیر و تعرق نیز در نظر گرفته

داده‌های استفاده شده

بر اساس اطلاعات دریافت شده از اداره کل هواشناسی استان آذربایجان غربی، مشخص شد که تعداد ۱۳ ایستگاه همدید فعال در سطح این استان وجود دارد که اکثر آنها به تازگی تأسیس شده و اطلاعات دوره آماری کوتاه‌مدت دارند. بررسی اطلاعات ثبت شده این ایستگاه‌ها نشان داد که فقط هفت ایستگاه همدید از ایستگاه‌های هواشناسی نامبرده، دوره آماری بلندمدت ۳۳ ساله (۱۹۸۷-۲۰۱۹) دارند که ایستگاه مهاباد نیز در فهرست ایستگاه‌های با دوره بلندمدت آماری بود. برای بررسی وضعیت خشک‌سالی از شاخص خشک‌سالی SPEI استفاده شد. به‌منظور بررسی اثر تغییرات اقلیم (باد و بارش) بر فعالیت ماسه‌ها و به‌منظور

است که همه آنها بر اساس دو عامل، تحرک تپه‌های ماسه‌ای را کاهش یا افزایش می‌دهند. عامل اول، درجه بادخیزی است (W) که به شکل درصد سالانه روزهایی که سرعت باد بیشتر از سرعت حد آستانه حرکت ماسه است، بیان می‌شود. اگر درجه بادخیزی (W) افزایش یابد، بیشتر تپه‌های ماسه‌ای متحرک خواهند بود. عامل دوم که به رشد پوشش گیاهی کمک می‌کند، به شکل نسبت بین میانگین سالانه بارندگی (P) و تبخیر بالقوه (PET) سالانه بیان می‌شود که به آن، نسبت بارندگی مؤثر نیز گفته می‌شود. اساس این مدل با عنوان شاخص تحرک تپه‌های ماسه‌ای لنکستر شناخته می‌شود (لنکستر ۱۹۸۸). این شاخص، بر پایه مدل توسعه یافته فرسایش بادی چپیل و همکاران پیشنهاد شده است (شپیل و همکاران ۱۹۶۳). در این مدل، اندازه تحرک ماسه (M) با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد.

$$M = \frac{W}{P/PET} \quad (2)$$

M: اندازه فعالیت رسوبات بادی، W: درصد فراوانی بادهای با سرعت بیشتر از سرعت آستانه فرسایش (m/s) در بلندی ۱۰ متری از سطح زمین، P: میانگین سالانه بارندگی (میلی‌متر)، PE: تبخیر و تعرق بالقوه سالانه (میلی‌متر) است.

شاخص M به طور گسترده‌ای به وسیله زمین‌شناسان و زمین‌ریخت‌شناسان برای تعیین تپه‌های ماسه‌ای فعال یا تثبیت شده استفاده شده است. درجه بندی تجربی این شاخص (M) عبارت است از، >۵۰، تپه‌های شنی غیرفعال و سطوح شن و ماسه به وسیله پوشش گیاهی تثبیت شده، ۵۰-۱۰۰، فعال فقط در مناطق تاج تپه‌های شنی، ۱۰۰-۲۰۰، تپه‌های شنی فعال اما، مناطق میان تپه‌های ماسه‌ای به وسیله پوشش گیاهی تثبیت شده و <۲۰۰، تپه‌های شنی به طور کامل فعال است. این شاخص، به خوبی نشان دهنده متغیرهای اقلیمی و محیط‌های زمین‌ریختی از دیدگاه فعالیت ماسه‌ها است. پس از محاسبه شاخص تحرک پذیری ماسه‌ها، اندازه‌های به دست آمده در نمودار تحرک پذیری ماسه‌ها رسم شد تا شاخص فعالیت آنها با یکدیگر مقایسه شوند. نمودار تعیین اندازه تحرک پذیری تپه‌های ماسه‌ای در شکل ۲، نشان داده شده است.

می‌شود، لذا، مناطقی با ناهنجاری مثبت دما، حتی در شرایط بارش مناسب، ممکن است در محدوده مناطق خشک‌سالی قرار گیرند. در شاخص SPEI یک تعادل آبی اقلیمی در اندازه‌های زمانی گوناگون (K) به کار گرفته می‌شود که مبتنی بر تفاوت اندازه بارش با اندازه تبخیر و تعرق است. این شاخص بر پایه بارش و تبخیر و تعرق بالقوه، بیلان آب را برای محاسبه شاخص خشک‌سالی لحاظ می‌کند و مبتنی بر محاسبه بیلان آب اقلیمی است و برای محاسبه آن به داده‌های ماهانه بارندگی و دمای هوا نیاز است (رابطه ۱).

$$Di = Pi - PETi \quad (1)$$

Pi: اندازه بارش (میلی‌متر)، PET: اندازه تبخیر و تعرق بالقوه (میلی‌متر) است که از روش تورنت‌وایت محاسبه می‌شود.

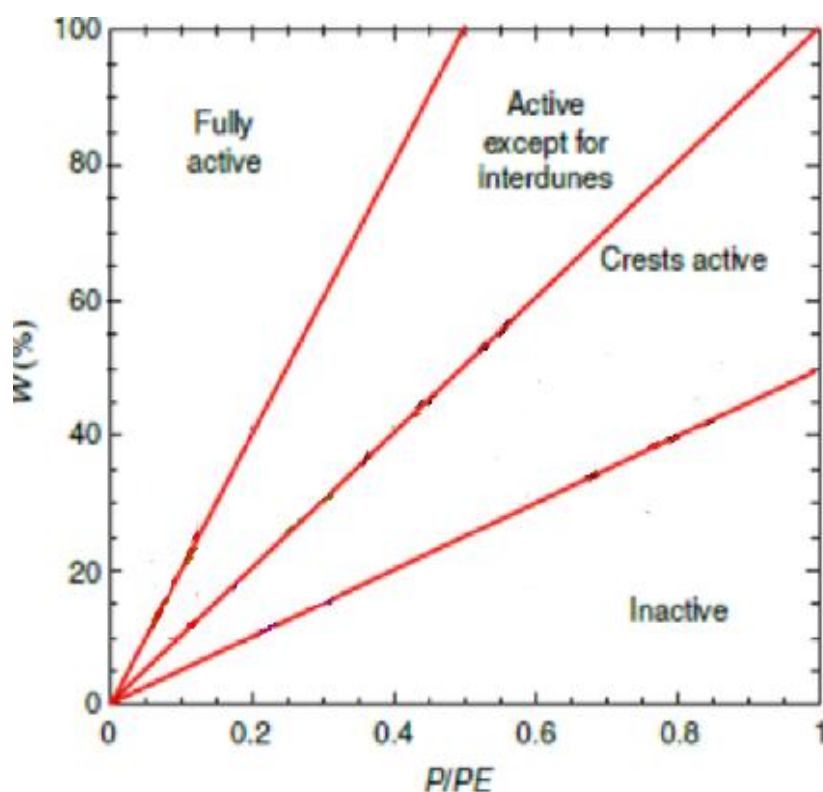
با استفاده از روش تورنت‌وایت، تبخیر و تعرق بالقوه برای هر یک از ماه‌های سال محاسبه شد. اساس این روش دمای میانگین ماهانه بود. نتایج شدت خشک‌سالی با استفاده از روش SPEI در جدول ۱، آورده شده است.

جدول ۱- طبقه‌بندی شاخص استاندارد بارش-تبخیر و تعرق بالقوه (SPEI).

Table 1- Classification of standardized precipitation evapotranspiration index.		
SPEI Values	Drought Classes	Row
>2.0	Extremely Wet	1
1.0 to 1.99	Severely Wet	2
1.0 to 1.49	Moderately Wet	3
-0.99 to 0.99	Near Normal	4
-1.49 to -1.0	Moderately Dry	5
-1.99 to -1.5	Severely Dry	6
< -2.0	Extremely Dry	7

بررسی تحرک پذیری ماسه‌های روان

برای بررسی اثر تغییر اقلیم، به ویژه باد و بارش بر فعالیت ماسه‌ها و به منظور پیش‌بینی احتمال تحرک تپه‌های ماسه‌ای و ماسه‌زارها و گرد و غبار ناشی از آنها، از روش جهانی لنکستر استفاده شد. از این روش می‌توان برای پیش‌بینی دهه‌های آینده نیز استفاده کرد. در بخش‌های مختلف جهان، شاخص‌های گوناگونی از فرسایش بادی و تحرک تپه‌های ماسه‌ای بررسی شده



شکل ۲ - نمودار تعیین اندازه تحرک پذیری تپه‌های ماسه‌ای.

Figure 2- Sand dunes mobility determination chart.

باران، باد و تبخیر در اندازه تحرک ماسه‌های روان تأثیر به‌سزایی دارند، از این‌رو، متغیرهای مدنظر در دامنه‌ای قابل قبول تغییر داده شدند. سپس، اثر این تغییرات در خروجی مدل یعنی اندازه تحرک ماسه محاسبه شد. به این ترتیب، حساسیت تحرک‌پذیری ماسه‌ها در مقابل افزایش یا کاهش هر یک از متغیرها مشخص شد. چنانچه اندازه باران در آینده کاهش یا افزایش یابد و یا اینکه مسایل گرمایش جهانی منجر به تبخیر بیشتر و یا کاهش یا افزایش اندازه باد شود وضعیت احتمالی این تغییرات مشخص می‌شود.

شاخص خشکی و خطر بیابان‌زایی

شاخص خشکی (AI)، نسبت بارش به تبخیر و تعرق (P/PE) است (برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد ۱۹۹۱). این شاخص به‌وسیله کنواسیون سازمان ملل متحد برای مقابله با بیابان‌زایی (UNCCD) نیز پیشنهاد شده است. این شاخص یک ابزار پژوهش علمی

پیش‌بینی اثر تغییرات احتمالی عامل‌های اقلیمی بر تحرک‌پذیری ماسه‌های روان

بیشتر تغییرات سطح زمین و جابه‌جایی‌های تپه‌های ماسه‌ای به دلیل تغییر در عناصر اقلیمی مثل سرعت باد و تبخیر و تعرق است. برای بررسی اثر احتمالی تغییر عناصر اقلیمی بر تحرک‌پذیری ماسه‌های روان و تشدید پدیده گرد و غبار، پس از محاسبه اندازه فعالیت رسوبات بادی، با استفاده از روش تحلیل حساسیت، اندازه تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی مدل، تعیین شد. به بیان دیگر، تحلیل حساسیت روشی برای تغییر دادن ورودی‌های یک مدل آماری به شکل سازمان یافته (سیستماتیک) است که بتوان تأثیرات این متغیرها را در خروجی مدل پیش‌بینی کرد. استفاده از تحلیل حساسیت به منظور تعیین رابطه‌های میان متغیرهای مدل با یکدیگر و همچنین برای تعیین اولویت تأثیر سنجه‌ها بر خروجی مدل استفاده شده است. از آنجایی که برخی از عناصر اقلیمی شاخص مانند

نتایج و بحث

تبخیر و تعرق بالقوه و خشک‌سالی‌ها

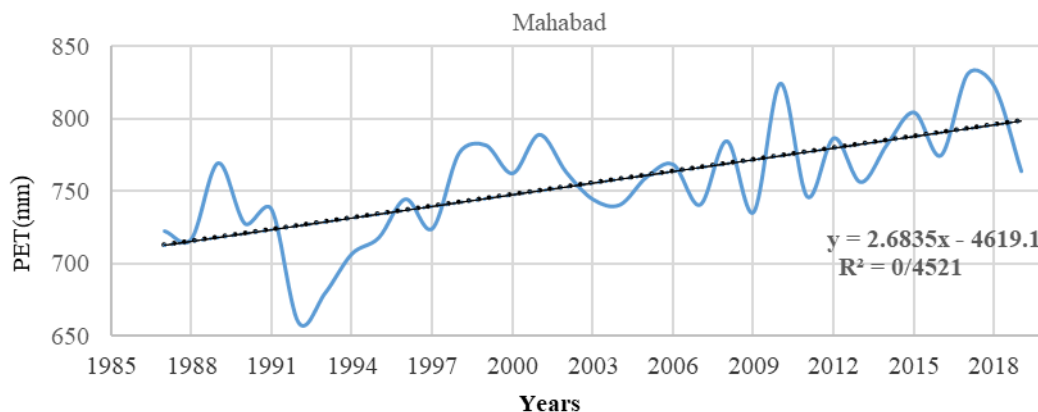
در این پژوهش محاسبات تبخیر و تعرق بالقوه و فراوانی و تداوم رخداد پدیده خشک‌سالی‌های هواشناسی، با استفاده از شاخص SPEI در گام‌های زمانی گوناگون، انجام شد. سپس، نتایج آن در گام زمانی ۱۲ ماهه برای ایستگاه مهاباد در نظر گرفته شد. بررسی نتایج تبخیر و تعرق بالقوه ایستگاه هواشناسی مهاباد نشان داد که مجموع تبخیر و تعرق بالقوه در این منطقه ۷۵۵/۹۸ میلی‌متر در سال و روند آن افزایشی بود. تبخیر و تعرق بالقوه سالانه در ایستگاه هواشناسی مهاباد در شکل ۳، نشان داده شده است.

ساده اما موثر برای تعیین وضعیت اقلیمی و خطر بیابان‌زایی مناطق گوناگون است. در این پژوهش، شاخص خشکی با روش یونپ UNEP و با استفاده از رابطه ۳، محاسبه شد.

$$AI = P/Eto \quad (3)$$

AI: شاخص خشکی، ETo : تبخیر و تعرق گیاه مرجع و P، مقدار بارش است.

در شرایط $AI < 0.03$ = اقلیم منطقه فراخشک، $0.03 \leq AI < 0.20$ = اقلیم منطقه خشک، $0.20 \leq AI < 0.50$ = اقلیم منطقه نیمه‌خشک، $0.50 \leq AI < 0.65$ = اقلیم منطقه نیمه‌مرطوب و $0.65 \leq AI$ = اقلیم منطقه مرطوب است.

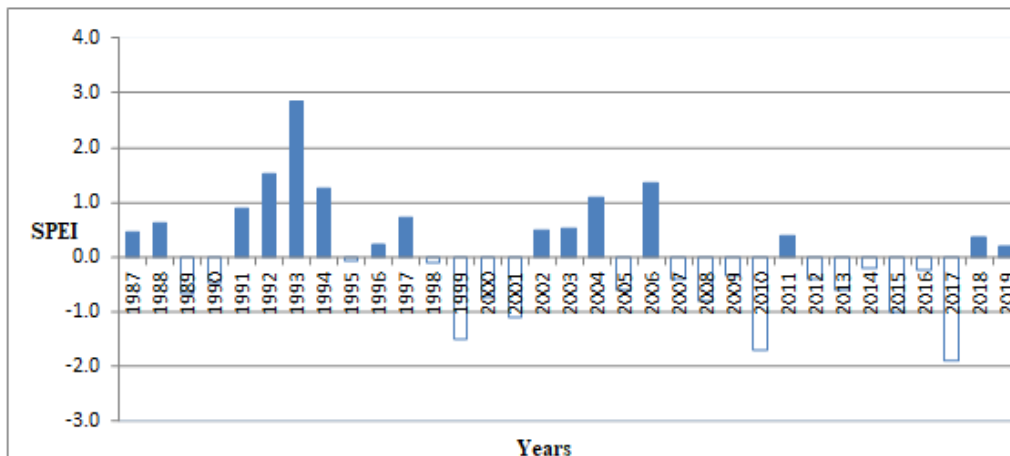


شکل ۳ - نمودار روند مجموع تبخیر و تعرق بالقوه سالانه در ایستگاه هواشناسی مهاباد.

Figure 2- Graph of total annual potential evapotranspiration trend in Mahabad Meteorological Station.

مرطوب بوده است. هر چند که در دوره پژوهش شده دو دوره کوتاه مرطوب نیز وجود داشت. توزیع شاخص خشک‌سالی SPEI در گام زمانی ۱۲ ماهه در شکل ۴ نشان داده شده است.

بر اساس شاخص خشک‌سالی SPEI، دو دوره خشک‌سالی در منطقه مشاهده شد. اولین دوره به مدت چهار سال (۱۹۹۸-۲۰۰۱) رخ داده است و طولانی‌ترین دوره خشکی از سال ۲۰۰۷ شروع شده و تا سال ۲۰۱۷ ادامه داشته است که در طول این دوره فقط سال ۲۰۱۱



شکل ۴- نمودار شاخص SPEI ایستگاه هواشناسی مهاباد.

Figure 4 - SPEI index diagram of Mahabad Meteorological Station.

تحرک پذیری تپه‌های ماسه‌ای

تغییرات سالانه سطح آب دریاچه و جریان آب از اطراف ساحل از بین رفته‌اند (شکل ۵). بنابراین، به دلیل نبودن و عدم شکل‌گیری آنها در سطح استان، فقط ایستگاه هواشناسی مهاباد به دلیل داشتن زمین‌های ساحلی خشک و گسترده، از نظر وضعیت باد و شاخص لنکستر بررسی شد.

با بررسی‌های انجام‌شده در سطح استان آذربایجان غربی مناطقی که تپه‌های ماسه‌ای شاخصی داشته باشند و یا در حال تشکیل باشند، تاکنون گزارش نشده است. ولی در بازدیدهای انجام‌شده از ساحل دریاچه ارومیه نشانه‌های کوچکی از شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای دیده شد که یک سال بعد به دلیل قرار گرفتن در محدوده



شکل ۵ - نمایی از شروع شکل‌گیری تپه ماسه‌ای در ساحل دریاچه ارومیه.

Figure 5- A view of the beginning of the sand dune formation on the Lake Shore.

جدول ۲- درصد فراوانی ماهانه طبقه‌های سرعت باد در ایستگاه هواشناسی مهاباد (۱۹۸۷-۲۰۱۹).

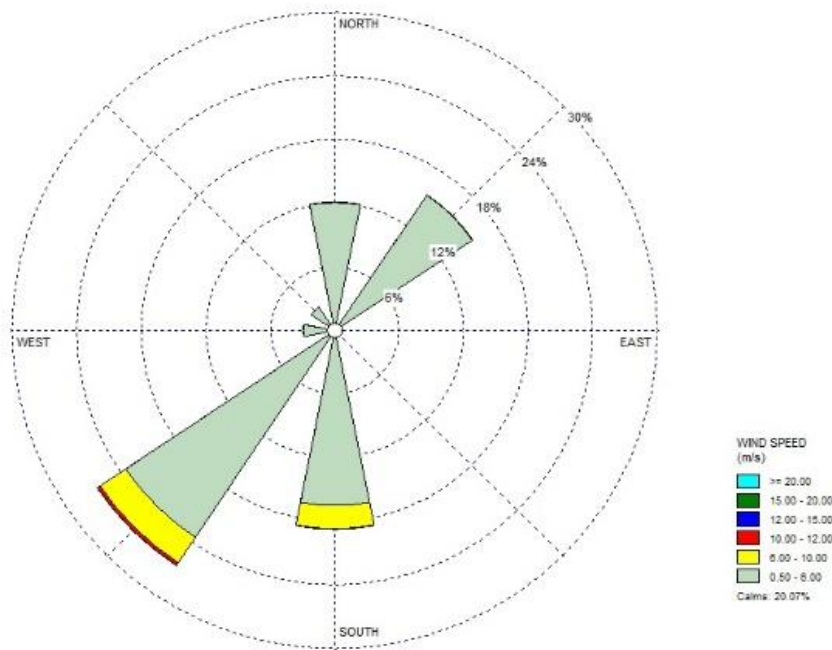
Table 2- The percentage of monthly frequency of wind speed classes in Mahabad Meteorological Station (1987-2019).

Month	<6	6--10	10--15	15--20	>20	>6%	mean
Jan	90.7	8.3	0.8	0	0	9.1	2.09
Feb	88.8	10.6	0.55	0.05	0	11.2	2.44
Mar	87.9	10.2	1.9	0	0	12.1	2.09
Apr	89.9	9.4	0.7	0	0	10.1	2.79
May	95.5	4.6	0.3	0.24	0	5.14	2.35
Jun	98.3	1.7	0	0	0	1.7	2.12
Jul	99.9	0.1	0	0	0	0.1	1.9
Aug	99.9	0.1	0	0	0	0.1	1.83
Sep	98.5	1.6	0	0	0	1.6	1.88
Oct	95.7	4.1	0.1	0	0	4.2	1.83
Nov	93.25	6.45	0.3	0	0	6.75	1.75
Dec	92.8	6.75	0.45	0	0	7.2	1.86

محاسبه شاخص لنکستر

و ۱/۱۰٪ بود. جهت و تواتر بادهای بیشتر از ۶ متر در ثانیه ایستگاه هواشناسی مهاباد در گلباد شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس این گلباد، جهت جغرافیایی باد غالب در این ایستگاه جنوب-جنوب غربی بود و ۲۷٪ از بادهای ثبت شده در این ایستگاه از این نوع بادهای جنوب غربی، همچنین، سرعت ۲۷٪ از بادهای غالب (۶-۱۰) متر در ثانیه بود. در این میان، سرعت کمتر از ۱٪ از بادهای غالب نیز (۱۰-۱۲) متر بود.

در این پژوهش، برای محاسبه شاخص تحرک پذیری تپه‌های ماسه‌ای موجود در منطقه از اطلاعات هواشناسی ایستگاه همدید مهاباد استفاده شد. آمار درصد ماهانه بادهای با سرعت بیشتر از سطح آستانه فرسایش (>6 m/sec) در ایستگاه هواشناسی مهاباد در بازه زمانی (۱۹۸۷-۲۰۱۹) در جدول ۲ آورده شده است. بر پایه نتایج این جدول، ۸۴٪ از بادهای ثبت شده در این ایستگاه سرعت کمتر از ۶ متر در ثانیه داشتند. در این میان، تمرکز شدیدترین بادهای مشاهده‌ای در ماه‌های (Mar)، (Feb) و (Apr) به ترتیب ۱۲/۱، ۱۱/۲

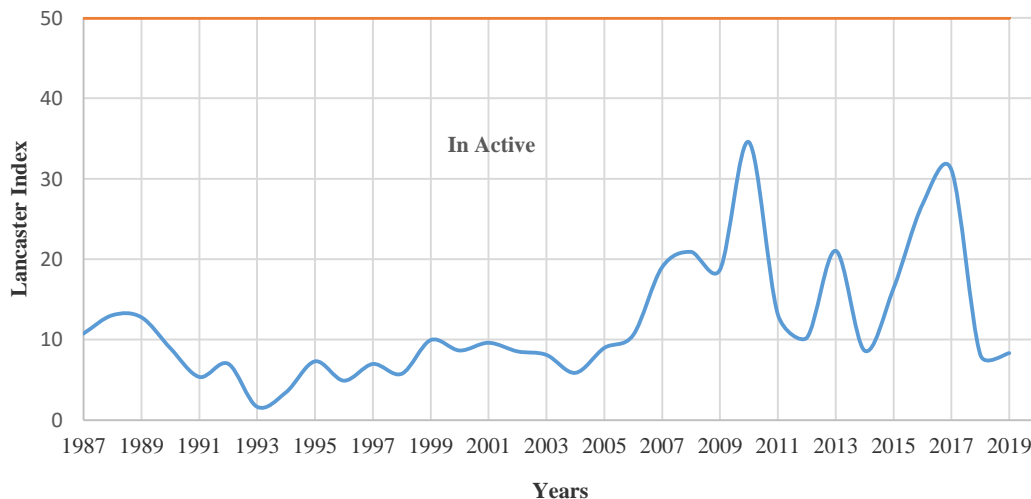


شکل ۶- گلباد ایستگاه مه‌آباد برای بادهای با سرعت بیشتر از ۶ متر در ثانیه (۱۹۸۷-۲۰۱۹).

Figure 6- Wind Rose for Mahabad station for winds with speed greater than 6 meters per second (1987-2019).

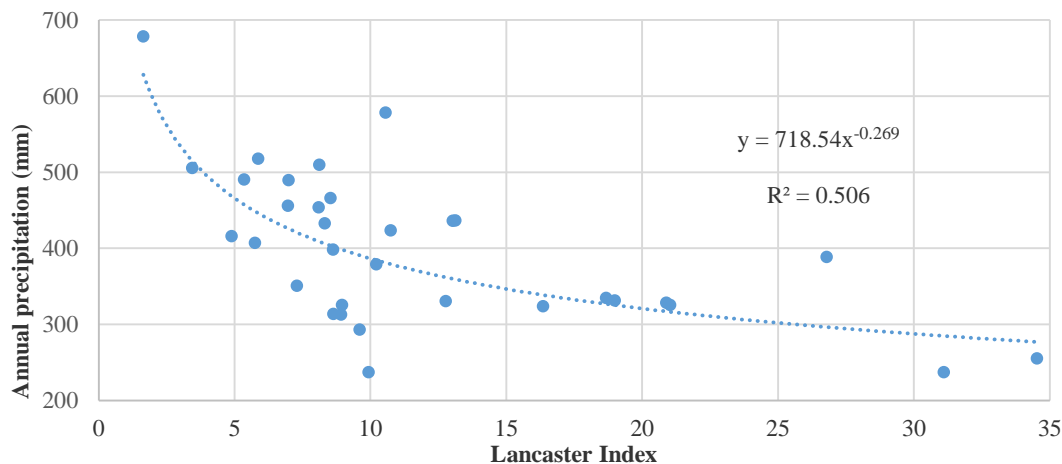
شاخص لنکستر در شکل ۸ نشان‌دهنده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش اندازه بارش، شاخص لنکستر کاهش یافت.

تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای موجود در منطقه، در بازه زمانی ۳۳ سال کمتر از ۵۰ بود که مشخص می‌شود که در وضعیت غیر فعال هستند (شکل ۷). بررسی همبستگی میان مجموع بارش سالانه ایستگاه مه‌آباد با



شکل ۷- نمودار تغییرات سالانه شاخص لنکستر در ایستگاه هواشناسی مه‌آباد (۱۹۸۷-۲۰۱۹).

Figure 7- Chart of annual changes of Lancaster Index at Mahabad meteorological station (1987-2019).



شکل ۸- نمودار همبستگی میان شاخص لنکستر و مجموع بارش سالانه در ایستگاه مهاباد (۱۹۸۷-۲۰۱۹).
Figure 8- Correlation diagram between Lancaster Index and total annual precipitation in Mahabad station (1987-2019).

از حد آستانه فرسایش در منطقه مهاباد به یک اندازه بود.

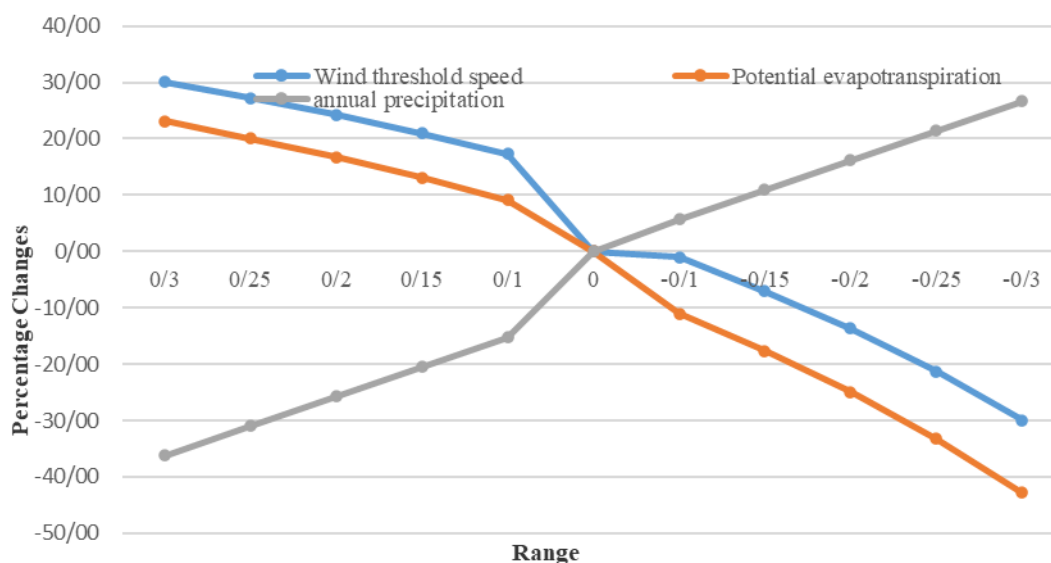
آهنگ تغییرات تحرک تپه‌های ماسه‌ای منطقه مهاباد نسبت به افزایش یا کاهش اندازه تبخیر و تعرق بالقوه منطقه نیز تقریباً یکسان بود، با این تفاوت که کاهش تحرک پذیری تپه‌های ماسه‌ای با کاهش اندازه تبخیر و تعرق بالقوه بیشتر از نرخ افزایش آن در حالت افزایش تبخیر و تعرق بالقوه است. حساسیت شاخص لنکستر نسبت به تغییرات عامل‌های اقلیمی در نمودار شکل ۹ نشان داده شده است.

تحلیل حساسیت شاخص لنکستر در منطقه مهاباد
 به‌منظور پیش‌بینی اندازه تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای منطقه مهاباد، حساسیت سنجه‌های اقلیمی مؤثر بر تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای در قالب شاخص لنکستر و در دامنه تغییرات ۳۰ تا ۳۰- تحلیل شد. نتایج این تحلیل در جدول ۳ آورده شده است. بر پایه نتایج مشاهده شده در این جدول، میان شاخص لنکستر با درصد بادهای بیشتر از حد آستانه فرسایش و اندازه تبخیر و تعرق، رابطه مستقیم و با میزان بارش، رابطه عکس وجود دارد. آهنگ تغییرات شاخص لنکستر نسبت به افزایش یا کاهش درصد بادهای با سرعت بیش

جدول ۳- حساسیت شاخص لنکستر نسبت به تغییرات عامل‌های اقلیمی برای تپه‌های ماسه‌ای.

Table 3- Lancaster Index sensitivity to the changes of climatic factors for sand dunes.

W	M	Percentage Changes	PET	M	Percentage Changes	P	M	Percentage Changes	Range
7.37	13.98	0.30	982.8	13.98	0.23	438.50	8.27	0.23	0.3
7.09	13.44	0.27	945.0	13.44	0.20	458.44	8.60	0.20	0.25
6.80	12.90	0.24	907.2	12.90	0.17	478.37	8.96	0.17	0.2
6.52	12.37	0.21	869.4	12.37	0.13	498.30	9.35	0.13	0.15
6.24	11.83	0.17	831.6	11.83	0.09	518.23	9.78	0.09	0.1
0.00	0.00		0.0			0.00			0
5.10	9.68	-0.01	680.4	9.68	-0.11	358.78	11.95	-0.11	-0.1
4.82	9.14	-0.07	642.6	9.14	-0.18	338.84	12.65	-0.18	-0.15
4.54	8.60	-0.14	604.8	8.60	-0.25	318.91	13.44	-0.25	-0.2
4.25	8.06	-0.21	567.0	8.06	-0.33	298.98	14.34	-0.33	-0.25
3.97	7.53	-0.30	529.2	7.53	-0.43	279.05	15.36	-0.43	-0.3



شکل ۹- نمودار حساسیت شاخص لنکستر نسبت به تغییرات متغیرهای اقلیمی برای تپه‌های ماسه‌ای مهاباد.
Figure 9- Sensitivity diagram of Lancaster Index to the changes of climatic variables for Mahabad sand dunes.

است. بر پایه نتایج مشاهده شده در این جدول، تمام ایستگاه‌های هواشناسی استان در وضعیت نیمه‌خشک تا مرطوب قرار دارند. ایستگاه‌های جنوبی استان نیمه‌مرطوب تا مرطوب بوده، در حالی که مناطق مرکزی و شمالی استان نیمه‌خشک هستند و در طبقه خطر شدید قرار گرفتند. در این بررسی، منطقه مهاباد نیز با خطر متوسط بیابان‌زایی و نیمه‌مرطوب مواجه بود که خطر بیابان‌زایی آن را تهدید می‌کند.

نتایج شاخص خشکی و خطر بیابان‌زایی باتوجه به وجود اندازه‌های بارش مشاهده‌ای ایستگاه‌های هواشناسی در سطح استان و محاسبه اندازه تبخیر و تعرق بالقوه با استفاده از روش نونت‌وایت برای تمام ایستگاه‌های هواشناسی مدنظر، شاخص خشکی برای هر کدام از این ایستگاه‌ها محاسبه شد. سپس، بر مبنای تقسیم‌بندی شاخص یونپ، وضعیت بیابان‌زایی هر کدام از ایستگاه‌ها مشخص و نتایج آن در جدول ۴ آورده شده

جدول ۴- وضعیت خطر بیابان‌زایی در سطح ایستگاه‌های هواشناسی استان و ایستگاه مهاباد براساس شاخص یونپ.
Table 4- Desertification risk status of meteorological stations of the province and Mahabad station based on UNEP Index.

Station	P	PET	P/PET	Dry Index (AI)	Desertification
Urmia	311.94	1181.3	0.46	Semi Dry	Severe
Piranshahr	673.17	1236.1	0.87	Wet	--
Tekab	323.18	1168.1	0.50	Semi Dry	Severe
Khoy	266.88	1097.9	0.36	Semi Dry	Severe
Sardasht	831.18	1336.2	1.07	Wet	--
Makou	304.08	1157.6	0.46	Semi Dry	Severe
Mahabad	397.03	1051	0.53	Semi-wet	Moderate Risk

نتیجه گیری و پیشنهادها

تغییر اقلیم مهمترین عامل تهدید بشر و نابودگر محیط زیست شناخته شده است. پدیده هایی مانند خشک سالی های گسترده، سیل های ویرانگر، آتش سوزی و همچنین گرد و غبار در مقیاس بزرگ، بخشی از پیامدهای تغییر اقلیم است (ولایت زاده ۲۰۲۰). طوفان های گرد و غبار از پدیده های متداول در بسیاری از نقاط جهان است که خطرهای جدی برای محیط زیست، اقتصاد و بهداشت به همراه دارد. رخداد پدیده گرد و غبار عمدتاً در قلمروهای اقلیمی خشک و نیمه خشک مشاهده می شود. این پدیده همبستگی خطی و مستقیمی با متغیرهای اقلیمی دارد و امروزه با قبول رخداد تغییر اقلیم، انتظار می رود فراوانی و شدت طوفان های گرد و غبار در اکثر کشورهای که در کمربند نیمه خشک هستند، افزایش یابد.

ایران به دلیل قرار گرفتن در کمربند خشک و نیمه خشک در معرض ساختارهای پر شمار گرد و غبار محلی و فرامحلی است (راشکی و همکاران ۲۰۱۳). همچنین، در چند سال اخیر، طوفان های گرد و غبار به شکل بحرانی جدی استان های کشور را درگیر کرده است و پیامدهای خطرناکی را در زمینه های زیست محیطی، بهداشتی و اقتصادی برای ساکنان این استان ها به وجود آورده است (کریمی و همکاران ۲۰۱۱).

بررسی داده های مشاهده ای مجموع سالانه بارش در ایستگاه هواشناسی مهاباد در بازه زمانی (۱۹۸۷-۲۰۱۹) نشان داد که روند این داده ها افزایشی یا کاهش می معنی دار نبود ولی بر اساس دمای سالانه و تغییرات سرعت باد، روند این داده ها افزایشی بود. همچنین، روند تعداد روزهای همراه با گرد و غبار نیز افزایشی بود.

با بررسی های انجام شده در سطح استان آذربایجان غربی، مناطقی که تپه ماسه ای شاخص داشته باشند و یا در حال تشکیل باشند، تاکنون گزارش نشده است. ولی در بازدیدهای میدانی از ساحل دریاچه ارومیه و در محدوده شهرستان مهاباد، نشانه های کوچکی از شکل گیری تپه های ماسه ای دیده شد که یک سال بعد به دلیل بودن قرار گرفتن در محدوده تغییرات سالانه سطح آب دریاچه و جریان آب از اطراف ساحل، از بین رفتند.

از این رو، به دلیل نبودن تپه ماسه ای و شکل گیری آن در سطح استان، فقط ایستگاه هواشناسی مهاباد از نظر وضعیت باد و شاخص لنکستر بررسی شد. شاخص لنکستر برای ایستگاه همدید مهاباد در تمام سال های آماری وضعیت غیرفعال را نشان داد. همچنین، در تمام سال های بررسی شده، تحرک پذیری تپه های ماسه ای موجود در منطقه کمتر از ۵۰ بود که بیانگر وضعیت غیرفعال است.

بر اساس تحلیل حساسیت سنجه های اقلیمی مؤثر بر تحرک پذیری تپه های ماسه ای در قالب شاخص لنکستر، میان شاخص لنکستر با درصد بادهای با سرعت بیشتر از حد آستانه فرسایش و اندازه تبخیر و تعرق، رابطه مستقیم بود و با اندازه بارش، رابطه عکس بود. نرخ تغییرات شاخص لنکستر نسبت به افزایش یا کاهش درصد بادهای با سرعت بیشتر از حد آستانه فرسایش در منطقه مهاباد به یک اندازه بود. آهنگ تغییرات تحرک تپه های ماسه ای منطقه مهاباد نسبت به افزایش یا کاهش اندازه تبخیر و تعرق بالقوه منطقه نیز تقریباً یکسان بود. اما، کاهش تحرک پذیری تپه های ماسه ای با کاهش اندازه تبخیر و تعرق بالقوه بیشتر از نرخ افزایش آن در حالت افزایش تبخیر و تعرق بالقوه بود (شکل ۹). بر مبنای تقسیم بندی شاخص یونپ، تمام ایستگاه های هواشناسی استان در وضعیت نیمه خشک تا مرطوب بودند. بر این اساس، مناطق جنوبی استان نیمه مرطوب تا مرطوب بود در حالی که، مناطق مرکزی و شمالی استان نیمه خشک و در طبقه خطر شدید بودند. در این بررسی، منطقه مهاباد نیز با خطر متوسط بیابان زایی و نیمه مرطوب مواجه بود که خطر بیابان زایی آن را تهدید می کند. بررسی های انجام شده در مناطق گوناگون کشور و حتی کشورهای خارجی بیانگر نبودن شرایط مشابه با منطقه مطالعه شده (منطقه مهاباد) است و دلیل آن شدت کم تبخیر و تعرق و همچنین، بارندگی مناسب است که شرایط را برای تشکیل تپه ماسه ای از بین برده است. ولی بر مبنای شاخص یونپ، منطقه با بیابان زایی مواجه است که با ادامه روند موجود و تشدید فعالیت های ویرانگر انسانی و تشدید گرد و غبار، احتمال تشکیل تپه ماسه ای بعید به نظر نمی رسد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منفعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش، از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/ آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله.
نویسنده دوم: مشاوره، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج.

فهرست منابع

- Chepil WS, Siddoway FH, Armbrust DV. 1962. Climatic factor for estimating wind erodibility of farm fields. *Journal of Soil and Water Conservation*. 17(4): 162-165.
- Chepil WS, Woodruff NP. 1963. The physics of wind erosion and its control. *Advances in Agronomy*. 15:211-302.
[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60400-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60400-9)
- Hanifehpour M, Biabani L, Khosravi H, Akbarpour-Bonab B. 2022. Monitoring and prediction of climatic factors affecting the mobility of sand dunes using the Lancaster Index (Case study: Sirjan Desert). *Geographical Studies of Dry Areas*. 48(13): 1-20. (In Persian).
<https://doi.org/10.22034/jargs.2023.373929.0>
- Houghton JT, Ding YDJG, Griggs DJ. 2001. *Climate change 2001. The scientific basis*. Cambridge: Cambridge university press. 881 (9).
- Hunter RE, Richmond BM, Rho Alpha TAU. 1983. Storm-controlled oblique dunes of the Oregon Coast. *Geological Society of America Bulletin*. 94(12):1450-1465.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1983\)94%3C1450:SODOTO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94%3C1450:SODOTO%3E2.0.CO;2)
- Karimi V, Karami E, Keshavarz M. 2018. Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture*. 17(1):1-15.
[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61794-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61794-5)
- Lancaster, N. 1988. Development of linear dunes in the southwestern Kalahari, southern Africa. *Journal of Arid Environ*. 14: 233-244.
- Lauenroth WK, In *Perspective in Grassland Ecology*, edited by N. French, Springer-Verlag, New York.
- McTainsh GH, Lynch AW, Burgess RC. 1990. Wind erosion in eastern Australia. *Soil Research*. 28(2):323-339.
<https://doi.org/10.1071/SR9900323>
- Naemi M, Zandifar S, Khosroshahi M, Ashoori P, Abbasi H. 2021. Investigating the effects of climate change on the mobility of sand dunes (Case study: Sabzevar City). *Desert Management*. 9(2):1-18. (In Persian).
<https://doi.org/10.22034/jdma.2021.246296>
- Nosrati K. 2014. Assessment of standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) for drought identification in different climates of Iran. *Environmental Sciences*. 12(4): 63-74. (In Persian).
- Rahi G, Bahreini F, Khosroshahi M. 2022. Monitoring and predicting the effect of climatic factors on sand-mobility using Lancaster Index: A case study of dayer, Bushehr Province. *Desert Ecosystem Engineering*. 11(36): 41-54. (In Persian).
<https://doi.org/10.22052/deej.2021.11.3.6.41>
- Rashki A, Kaskaoutis DG, Goudie AS, Kahn RA. 2013. Dryness of ephemeral lakes and consequences for dust activity: The case of the Hamoun Drainage Basin, southeastern Iran. *Science of the Total Environment*. 463-464: 552-564.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.045>
- Sarnthein M. 1978. Sand deserts during glacial maximum and climatic optimum. *Nature*. 272(5648):43-46.
<https://doi.org/10.1038/272043a0>
- Tsoar H, Møller JT. 2020. The role of vegetation in the formation of linear sand dunes. *Aeolian Geomorphology*. pp. 75-96 .
- Velayatzadeh M. 2020. Introducing the causes, origins and effects of dust in Iran. *Journal of Air Pollution and Health*. 5(1): 63-70.
- Yousefi Mobarhan E, Ghodrati M, Khosroshahi M. 2021. Monitoring and forecasting of effective climatic factors on the mobility of sand dunes in Semnan Province. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*. 10(4): 127-142. (In Persian).
<https://doi.org/10.30495/wsrcj.2021>



The Effect of Changes in Climate parameters on the Mobility and Stability of Sand Dunes in the Watershed of Lake Urmia - Mahabad Station

Ahmad Najafi Igdır ^{1*}, Alireza Majidi ²

1- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran

2- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Research Institute, AREEO, Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Sand dunes with their unique system can be mobile or stable, and the main factor influencing their stability is the presence of vegetation cover. The unique characteristics of sand dunes and their high hydraulic conductivity increase the rate of rainwater infiltration. With the drying of sand particles and the loss of cohesion between grains, weak vegetation and wind erosion will occur. Considering the new climatic conditions prevailing in the areas surrounding Urmia Lake, the aim of this research is to identify and examine the new sand dunes and their movement trends in these regions. Therefore, due to the absence and their formation at the provincial level, only the Mahabad meteorological station was examined regarding wind conditions and the Lancaster index.

Research materials and Methods

In this research, to examine the effect of climate changes (wind and precipitation) on sand activity and to predict the likelihood of mobility of sand dunes and sand fields, as well as the dust generated from them, the global Lancaster method was used. Based on the Lancaster index, the relationship between sand mobility and climatic variables was modeled. Then, sand and dust particles move following winds with speeds exceeding the erosion threshold, which has an inverse relationship with effective precipitation. Therefore, the necessary data including precipitation statistics, temperature, wind, and relative humidity of the Mahabad station were obtained from the Provincial Meteorological Organization. Also, in order to determine dry and wet years and their effects on the increase or decrease of dust days, the SPEI index was used. Potential evapotranspiration, frequency, and continuity of meteorological droughts can be calculated using the SPEI index. To determine the climatic status and the risk of desertification, the aridity index (AI) was used. Considering the precipitation and potential evapotranspiration measurements, the aridity index was calculated using the Torrent-White method, and the desertification status of the region was determined according to the UNEP classification. This index is an effective tool for determining the climatic status and desertification risk of various regions.

Article Type: Research Article

*Corresponding Author E-mail: homanh45@gmail.com

Citation: Najafi Igdır, A., Majidi, A.R. 2024. The Effect of Changes in Climate Parameters on the Mobility and Stability of Sand Dunes in the Watershed of Lake Urmia - Mahabad Station. *Watershed Management Research*. 38(1): 61-77.

DOI: 10.22092/WMRJ.2024.364663.1568

Received: 13 January 2024, **received in revised form:** 21 January 2024, **Accepted:** 18 March 2024

Published online: 01 January 2025

Watershed Management Research, Vol. 38, No.1, Ser. No:146, spring 2025, pp. 61-77.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center

©Author(s)



Results and Discussion

In this research, using the SPEI index, data on potential evapotranspiration, frequency, and duration of meteorological drought events were collected. The results showed that the total potential evapotranspiration at the Mahabad station was 755.98 mm per year, with an increasing trend. About 84% of the winds recorded in this station have a speed of less than 6 m per second. Meanwhile, the concentration of the strongest observed winds is in the months of (Mar), (Feb) and (Apr) with 12.1, 11.2 and 10.1 percent, respectively. Additionally, 27% of the prevailing winds had speeds between 6 to 10 meters per second, while less than 1% of the prevailing winds had speeds between 10 to 12 meters per second. According to the Lancaster index, the mobility of the existing sand dunes in the area over a 33-year period was less than 50, indicating that their status was inactive. The relationship between the Lancaster index and the percentage of winds exceeding the erosion threshold was direct, while it was inverse with the amount of precipitation. In the Mahabad region, the rate of changes in the Lancaster index in relation to the increase or decrease in the percentage of winds exceeding the erosion threshold was equal. The mobility of the sand dunes is a function of changes in potential evapotranspiration in the area and has a direct relationship with it. Therefore, with an increase in potential evapotranspiration, mobility also increases. The aridity index obtained, according to the classification provided by UNEP, showed that all meteorological stations in the province are in a semi-arid to humid status. Consequently, the Mahabad region faces a medium risk of desertification, which threatens its semi-humid status.

Conclusion and Suggestions

Based on the studies conducted in West Azerbaijan Province, areas with significant sand dunes or those currently forming have not been reported so far. However, during visits to the shores of Lake Urmia and within the boundaries of Mahabad County, small signs of sand dune formation were observed, which disappeared a year later due to being within the range of annual water level fluctuations of the lake and the flow of water from the surrounding shore. In this study, while recognizing the trend of changes in climatic elements and the correlation between these factors as independent variables, the possible effects of climate change on the dust phenomenon and the mobility of existing sand dunes have been investigated. In all statistical years, the mobility of existing sand dunes in the region was less than 50 and the Lancaster index obtained for the Mahabad synoptic station showed an inactive state. Also, based on the sensitivity analysis of the Lancaster index, the decrease in the mobility of sand dunes with a decrease in the potential evapotranspiration was greater than the rate of increase in mobility under conditions of increased potential evapotranspiration. Based on the UNEP index classification, the Mahabad region has a semi-humid aridity index with the lowest level of evapotranspiration, facing a medium risk of desertification. Therefore, considering the prevailing climatic conditions, it is recommended to be extremely careful and sensitive in land use and to use optimal irrigation methods in agriculture and drinking.

Keywords: Climate change, Lancaster index, Sand Dunes, Standard index of precipitation-evapotranspiration potential

Article Type: The Effect of Changes in Climate parameters on the Mobility and Stability of Sand Dunes in the Watershed of Lake Urmia - Mahabad Station.

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

Ahmad Najafi Igdir 1: Conceptualization, software/statistical analyses, writing the first draft of the article. Alireza Majidi 2: Consulting, editing and reviewing the article, control of result.



مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مازان تحقیقات، آموزش و توسعه کشاورزی

پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر فرساینده‌های باران در آبخیز تالار استان مازندران، ایران

شمیم احمدی^۱، عطا اله کاویان^{۲*}، کریم سلیمانی^۲، کاکا شاهی^۴، عبدالواحد خالدی درویشان^۵

۱- دانشجوی دکتری آبخیزداری، گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲، ۳ و ۴- استاد گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۵- دانشیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس نور

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

تغییرات اقلیمی یکی از چالش‌های بزرگ زیست‌محیطی است که تأثیرات گسترده‌ای بر فرایندهای طبیعی و انسانی دارد. این تغییرات می‌توانند چرخه‌های هیدرولوژیکی را تحت تأثیر قرار داده و موجب تغییر در الگوی بارش و فرسایش خاک شوند. افزایش دما و تغییرات در میزان و شدت بارش‌ها می‌تواند تأثیرات مخربی بر پایداری منابع آب و خاک داشته باشد. کاهش بارش در برخی مناطق و افزایش آن در نواحی دیگر منجر به تغییر در توزیع مکانی و زمانی رواناب خواهد شد که می‌تواند بر ظرفیت ذخیره‌سازی آب‌های سطحی و زیرزمینی تأثیر بگذارد. با توجه به اهمیت مدیریت منابع طبیعی و پیش‌بینی پیامدهای تغییرات اقلیمی در این پژوهش، تأثیر تغییرات اقلیمی بر بارندگی و فرساینده‌های باران در آبخیز تالار بررسی شد. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی اثرات سه سناریوی اقلیمی SSP۱-۲.۶، SSP۲-۴.۵ و SSP۵-۸.۵ بر بارش و فرساینده‌های باران در آینده نزدیک سال ۱۴۲۵ بود. با پیش‌بینی تغییرات اقلیمی آینده نزدیک سال ۱۴۲۵، می‌توان برای اثرات کوتاه‌مدت آن مانند کمبود آب، خشک‌سالی و سیلاب آماده شد و برنامه‌ریزی‌های لازم در زمینه مدیریت منابع آب و خاک، کشاورزی، زیرساخت‌ها و توسعه اقدامات مناسب برای سازگاری با تغییرات اقلیمی را انجام داد. همچنین، بررسی تغییرات اقلیمی به سیاست‌گذاران کمک خواهد کرد تا در طراحی و اجرای برنامه‌های بلندمدت توسعه پایدار تصمیمات مؤثرتری اتخاذ کنند.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.kavian@sanru.ac.ir

استناد: احمدی، ش.، کاویان، ع.، سلیمانی، ک.، شاهی، ک.، خالدی درویشان، ع. ۱۴۰۴. پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر فرساینده‌های باران در آبخیز تالار استان مازندران، ایران. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۸(۱): ۷۸-۹۵.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2024.366200.1588

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۴، دوره ۳۸، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۴۶، بهار ۱۴۰۴، صفحه‌های ۷۸ تا ۹۵.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



مواد و روش‌ها

روش‌شناسی این پژوهش شامل استفاده از داده‌های بارش پنج ایستگاه (قراخیل، شیرگاه، پل سفید، سنگده، آلاشت) در منطقه مطالعه‌شده در بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴ بود. سپس، بارش آینده نزدیک با استفاده از داده‌های مدل‌های اقلیمی CMIP6 شامل MIROC6، ACCESS_CM2، CAN5 و CNRM_CM6 و نرم‌افزار ریزمقیاس نمایی CMHYD شبیه‌سازی شد. انتخاب بهترین مدل برای ریزمقیاس‌نمایی بارش، بر اساس مقایسه نتایج مدل‌های مختلف با داده‌های مشاهداتی انجام شد. به منظور ارزیابی و مقایسه مدل‌های شبیه‌سازی، از معیارهای میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2)، ضریب نش-ساتکلیف (NSE) و همبستگی (R) و منحنی تیلور استفاده شد. بر اساس نتایج، بهترین عملکرد در شبیه‌سازی بارش و فرساینده‌گی باران آبخیز تالار مربوط به مدل MIROC6 با روش LI بود. شاخص فرساینده‌گی باران (R) برای دوره پایه و آینده محاسبه و تغییرات آن در سناریوهای مختلف بررسی گردید. علاوه بر این، برای تحلیل تغییرات مکانی و زمانی بارندگی و فرساینده‌گی باران از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شد. این تحلیل‌ها کمک کردند تا نواحی آسیب‌پذیر شناسایی شده و در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی مورد توجه قرار گیرند.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که تغییرات بارندگی تحت تأثیر تغییر اقلیم در سناریوهای گوناگون متفاوت است. یافته‌های پژوهش بیانگر آن بود که در آینده در سناریوی خوش‌بینانه SSP1-2.6، با افزایش ۴۳٪ بارش، فرساینده‌گی باران نیز ۱۶/۸۹٪ افزایش یافت. این افزایش می‌تواند در دوره‌های خشک و تر تأثیرات متفاوتی بر فرسایش خاک داشته باشد، به گونه‌ای که در دوره‌های مرطوب باعث افزایش فرسایش خاک شده و در دوره‌های خشک موجب تغییر در الگوی رواناب می‌شود. در سناریوهای متوسط SSP2-4.5 و بدبینانه SSP5-8.5، با کاهش بارش به ترتیب ۳۸/۶ و ۱/۲۸٪، فرساینده‌گی باران نیز به ترتیب ۳۷/۹ و ۱۰/۸٪ کاهش یافت. نتایج تحلیل مکانی نشان داد در بخش‌هایی از آبخیز که شامل کاربری‌های جنگل و مرتع بودند، بارش و فرساینده‌گی باران کاهش یافت. همچنین، در مناطق مسکونی مانند پل سفید، افزایش ساخت و ساز و ایجاد سطوح نفوذناپذیر سبب کاهش پوشش گیاهی و افزایش آسیب‌پذیری در برابر بارش‌های شدید شد. در مناطق مانند شیرگاه، با افزایش بارش و فرساینده‌گی باران، خطر زمین‌لغزش‌ها و فرسایش در ترانشه‌های جاده‌ای افزایش یافت. این تغییرات می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر فرسایش خاک و مدیریت منابع آب در منطقه داشته باشد. در این راستا، لزوم توجه به اقدامات حفاظتی و پایش مستمر تغییرات اقلیمی در منطقه تأکید می‌شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یافته‌های این پژوهش نشان داد که تغییرات اقلیمی تأثیرات جدی بر منابع طبیعی و معیشت ساکنان آبخیز تالار دارند. از این رو، اقدامات بیدرنگ در راستای مدیریت پایدار منابع آب و خاک، برای سازگاری با این تغییرات لازم و ضروری است. این اقدامات شامل نظارت بر تعداد دام ورودی به مراتع، حفاظت از پوشش گیاهی و کشت گیاهان مقاوم به فرسایش و توسعه روش‌های آبخیزداری است. همچنین برای کاهش آسیب‌های ناشی از بارش‌های شدید، استفاده از پوشش‌های گیاهی مناسب در مناطق مستعد فرسایش، پایش تغییرات پوشش گیاهی و به‌کارگیری روش‌های مهار فرسایش در آبخیزها مورد توجه قرار گیرد. سیاست‌گذاران و مدیران منابع طبیعی می‌توانند از نتایج این پژوهش در تصمیم‌گیری‌های مناسب برای کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی و بهبود مدیریت منابع آب و خاک استفاده کنند. افزون بر این، برای توسعه پژوهش‌های بیشتر و برنامه‌ریزی‌های راهبردی در زمینه مدیریت آبخیزها می‌توان از داده‌های پیش‌بینی‌شده فرسایش باران آینده از این پژوهش استفاده کرد. علاوه بر بررسی تغییرات شدت بارندگی و تأثیر آن بر فرسایش خاک در پژوهش‌های آینده توصیه می‌گردد. همچنین، انجام مطالعات میدانی و استفاده از مدل‌های عددی پیشرفته می‌تواند در بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و تدوین راهکارهای مناسب برای مدیریت تغییرات اقلیمی مفید باشد.

واژگان کلیدی: cmhyd، بارش، تغییرات اقلیمی، گزارش ششم

مقدمه

فرسایش خاک آب، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی جهان، وابستگی زیادی به تغییرات اقلیمی و توسعه پایدار دارد (شوو و همکاران ۲۰۲۳؛ ملبوسی و همکاران ۲۰۲۳). گرمایش جهانی به‌عنوان یکی از پیامدهای تغییر اقلیم است که با افزایش تبخیر از سطوح اقیانوسی و ورود آن به جو موجب افزایش بارش در کره زمین می‌شود. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد پاسخ اقلیم غرب آسیا به گرمایش جهانی، در خصوص بارش، عموماً کاهش است (باباییان و همکاران ۲۰۱۰؛ ای پی سی سی ۲۰۱۴؛ دولابیان و همکاران ۲۰۲۰). تغییرات در وضعیت‌های بارندگی طبیعی ناشی از تغییرات اقلیم و فعالیت‌های انسانی است که می‌تواند تأثیرات مستقیم بر فرسایش آبی داشته باشد (نیرینگ و همکاران ۲۰۰۴؛ ما و همکاران ۲۰۲۳). در کشور ایران بررسی اثرات تغییر اقلیم در بخش کشاورزی، تولید و امنیت مواد غذایی به یکی از چالش‌های اصلی تبدیل شده است (پیبانی و همکاران ۲۰۱۰). آگاهی از روند تغییرات بارش و دیگر متغیرهای اقلیمی می‌تواند مقاومت و انعطاف‌پذیری جامعه‌ها را در برابر پیامدهای ناگوار تغییر اقلیم افزایش دهد (باباییان و همکاران ۲۰۲۳). مطالعات پرشماری قدرت فرساینده‌گی باران را تحت تأثیر تغییر اقلیم بررسی کرده‌اند. در این راستا، توانگر و همکاران (۲۰۱۶) اثر تغییرات اقلیم بر فرساینده‌گی باران در سواحل جنوبی خزر را بررسی کردند. این پژوهشگران دریافتند که در بیشتر نقاط منطقه مطالعه‌شده تغییر اقلیم منجر به افزایش عامل فرساینده‌گی باران شد که دلیل آن افزایش شدت بارش و رخدادهای بیشتر حدی بارش در آینده پیش‌بینی شد. در پژوهشی، فلاح و همکاران (۲۰۲۱) اثرات تغییر اقلیم آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) را با استفاده از مدل‌های اقلیمی (CMIP5)^۱ و (CMIP6)^۲ در منطقه طشک بختگان شبیه‌سازی کردند و گزارش کردند در بیشتر مدل‌ها و

سناریوها، کاهش بارش (۰/۵ و ۱/۱۵٪) مشاهده شد. خادم‌رسول و عامری (۲۰۲۲) گزارش کردند اندازه بارش منطقه جنوب‌غرب ایران در آینده کاهش خواهد یافت و این کاهش سبب کاهش عامل فرساینده‌گی باران و در نتیجه کاهش فرسایش خاک نیز خواهد شد. شکوهیده و همکاران (۲۰۲۲) شاخص فرساینده‌گی باران خراسان جنوبی را برای دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله برآورد کردند. نتایج این پژوهش نشان داد در هر دو سناریوی اقلیمی SSP126 و SSP245 اندازه فرساینده‌گی باران از دوره بازگشت ۲ سال به ۱۰۰ سال افزایش یافت. کوه‌شاهی و همکاران (۲۰۲۳) اثرات تغییر اقلیم بر عامل فرساینده‌گی باران در آبریز میناب را ارزیابی کردند. به این منظور داده‌های خروجی دو مدل BCC-CSM2-MR و CanESM5، سناریوهای ۲/۶، ۴/۵، ۸/۵ و شاخص فرساینده‌گی باران سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ برآورد شد. این پژوهشگران دریافتند که روند عامل فرساینده‌گی باران متأثر از تغییرات اقلیمی، افزایشی بود و در آینده نزدیک (۲۰۴۰) موجب افزایش فرسایش خواهد شد. پانگوس و همکاران (۲۰۲۲) افزایش قابل‌توجهی در فرساینده‌گی باران جهانی برای سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ پیش‌بینی کردند. نتایج پژوهش‌ها نیز در رومانی (پاتریش و همکاران ۲۰۲۳)، چین (لی و همکاران ۲۰۲۴؛ وانگ و همکاران ۲۰۲۳)، ایالات‌متحد (تاخلم‌بام و همکاران ۲۰۲۳) و اروپای مرکزی (اوبر و همکاران ۲۰۲۴) نشان‌دهنده تغییرات قابل‌توجه در الگوهای بارندگی و فرساینده‌گی باران در بیشتر مناطق مطالعه‌شده بود. در این پژوهش‌ها از مدل‌های گردش عمومی جو (GCM)^۳، سناریوهای گوناگون انتشار (RCP)^۴ و (SSP)^۵ و روش‌های ریزمقیاس‌نمایی برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و اثرات آن استفاده شده است. نتایج پژوهش‌ها بیانگر تغییرات قابل‌توجه در روند بارش و فرساینده‌گی باران تحت تأثیر تغییر اقلیم است و بر اهمیت در نظر گرفتن این تغییرات در برنامه‌ریزی‌های آینده، به‌ویژه در زمینه

3-Global Circulation Model (GCM)

4-Representative Concentration Pathways (RCP)

5-Shared Socioeconomic Path ways (SSP)

1-Coupled Model Intercomparison Project Phase5 (Cmip5)

2-Coupled Model Intercomparison Project Phase6 (Cmip6)

های دوره پایه است. در این پژوهش به‌منظور هماهنگی در انتخاب دوره پایه در پژوهش‌های گوناگون تغییر اقلیم و امکان مقایسه آن‌ها، با در نظر گرفتن بیشترین هم‌پوشانی داده‌ها، امکان مقایسه با دوره آینده پیش‌بینی شده (۱۴۲۵) دوره آماری ۲۰۱۴-۱۹۸۵ به‌عنوان دوره پایه انتخاب شد. متغیرهای اقلیمی لازم در این پژوهش شامل سری زمانی ۳۰-۱۰ ساله از داده‌های روزانه، بارش (ایستگاه‌های همدید و باران‌سنجی) بود. برای تهیه نقشه با دقت مطلوب از تمام داده‌های موجود استفاده شد. مشخصات ایستگاه‌های استفاده‌شده در جدول ۱ ارائه شده است.

عامل فرساینده‌گی باران R

فرساینده‌گی باران بیانگر تنش واردشده از سوی قطرات باران بر خاکدانه‌های سطح خاک است و به‌منظور بررسی اثر متغیر اصلی فرساینده (باران) بر فرسایش خاک ارائه شده است (عظیمی‌سرداری و همکاران ۲۰۱۹). در این پژوهش لازم بود تا داده‌های بارندگی برای بیشترین دوره آماری موجود از تمام ایستگاه‌های هواشناسی (همدید و باران‌سنجی) در درون و پیرامون آبخیز جمع‌آوری شود. به‌دلیل کمبود داده در این مقیاس از اندازه‌های بارندگی ماهانه و سالانه ایستگاه‌ها در آبخیز برای برآورد شاخص R استفاده شد و این شاخص با استفاده از رابطه ۱ برآورد شد (بابو و همکاران ۲۰۰۴؛ جین و داس ۲۰۱۰؛ بناویدز و همکاران ۲۰۱۸).

$$R = 81.5 + (0.38 \times P) \quad (1)$$

P: میانگین بارندگی سالانه (میلی‌متر) برای یک ایستگاه و R: فرساینده‌گی باران سالانه همان ایستگاه است. این رابطه برای مناطقی با میانگین بارندگی سالانه ۳۴۰ تا ۳۵۰۰ میلی‌متر قابل استفاده است.

مدیریت منابع آب و حفاظت خاک تأکید می‌کند. با توجه به اهمیت خاک و هدررفت آن، و همچنین ضرورت پیش‌بینی و پایش درازمدت شرایط آب و هوایی شمال کشور و ارزیابی اندازه تغییرات، عامل فرساینده‌گی در سال‌های آینده آبخیز تالار برای بررسی انتخاب شد تا برای اثرات کوتاه‌مدت آن برنامه‌ریزی‌های لازم انجام شود. در این پژوهش پس از انتخاب مناسب‌ترین مدل اقلیمی آبخیز تالار در میان مدل‌های اقلیمی MIROC6، ACCESS_CM2، CAN5، CNRM_CM6 گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، قدرت فرساینده‌گی باران برای آینده نزدیک (۱۴۲۵) آبخیز تالار برآورد شد و تغییرات آن ارزیابی شد.

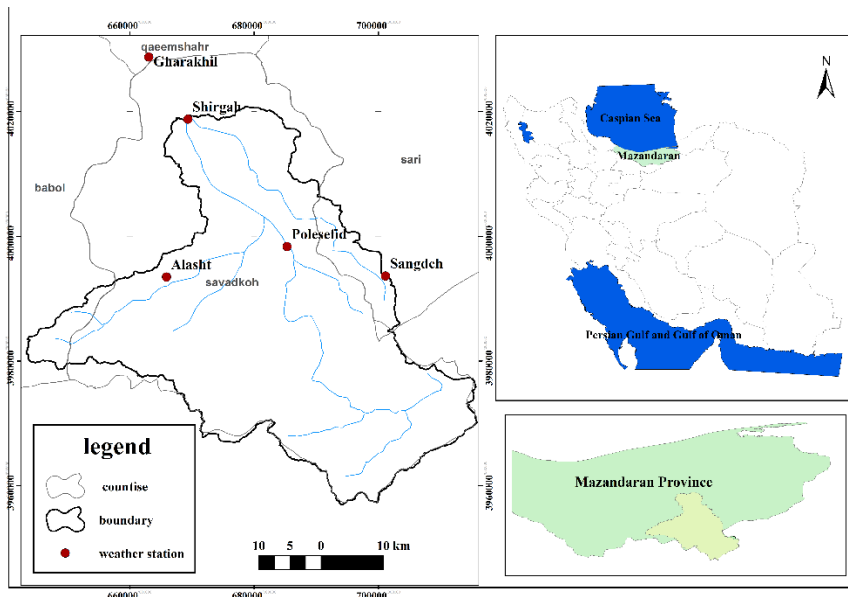
مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

آبخیز تالار در البرز مرکزی از آبخیزهای دریای خزر است. منطقه مطالعه شده یک رود اصلی با طول ۱۵۲ کیلومتر و پنج رود فرعی دارد. میانگین سالانه بارندگی ۶۲۵ میلی‌متر، کمترین و بیشترین دمای سالانه ۷/۷ و ۲۱°C و وضعیت بارش مدیترانه‌ای است. مساحت کل آبخیز ۲۰۵۳ کیلومترمربع است. بلندی آبخیز تالار از ۲۸- تا ۳۹۱۰ متر از سطح دریای آزاد است. شکل عمومی آبخیز پهن و امتداد شمالی-جنوبی دارد (شرکت سهامی آب منطقه‌ای مازندران ۲۰۰۹؛ حسینی و همکاران ۲۰۱۱؛ محمدی و همکاران ۲۰۱۶). منطقه مطالعه شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

روش پژوهش

با توجه به اهمیت پایش‌های اقلیمی برای پیش‌بینی روند رخداد‌های فرسایشی، آبخیز تالار برای مطالعه انتخاب شد. در پژوهش‌های تغییر اقلیم، نیاز به داده



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعه‌شده در استان مازندران و کشور.
 Figure 1- Location of the study area in Mazandaran Province and the country.

جدول ۱- ایستگاه‌های هواشناسی استفاده‌شده در این پژوهش.

Table 1- Meteorological Stations Used in This Study.

Elevation (m)	Latitude	Longitude	Available statistical period	Type of station	Station name
14.7	36.45	52.77	30	Synoptic	Qarakhil
529	36.17	52.53	30	Rain gauge	Shirgah
610	36.06	53.03	15	Rain gauge	Pol Sefid
1337	36.04	53.14	30	Rain gauge	Sang Deh
1805	36.07	58.84	11	Synoptic	Alasht

مدل مناسب جهت ریزمقیاس نمایی انتخاب شد. سرانجام، سری زمانی بارش آینده تولید شد. این داده‌ها با نرم‌افزار اکسل به نرم‌افزار ArcMap انتقال یافت. در مرحله بعد با استفاده از روش‌های پهنه‌بندی از حالت نقطه‌ای و گسسته به یک لایه سطحی و پیوسته تبدیل شد. بر اساس پژوهش‌های پیشین روش پهنه‌بندی IDW برای تهیه لایه رستری عامل فرساینده‌گی باران R استفاده شد (احمدی و همکاران ۲۰۱۴). روندنمای ساخت لایه فرساینده‌گی باران برای آینده نزدیک در شکل ۲ نشان داده شده است. در مدل‌های فاز ششم از

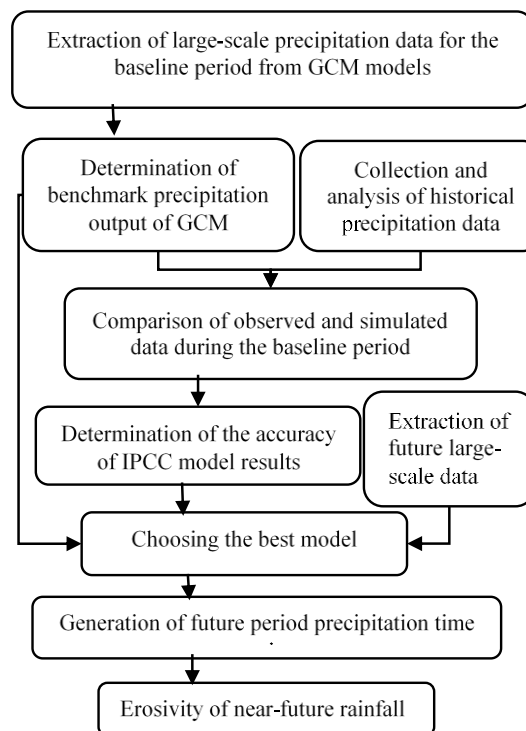
به‌منظور ساخت لایه فرساینده‌گی باران گذشته از داده‌های موجود بارندگی منطقه استفاده شد و برای آینده از گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) و سناریوهای واداشت تابشی متغیر اقلیمی بارش استفاده شد. از محدودیت‌های مدل‌های اقلیمی GCM، بزرگ‌مقیاس بودن متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی‌شده است. با استفاده از نرم‌افزار ریزمقیاس نمایی (CMHYD)، سری زمانی بارش آینده نزدیک ۱۴۲۵ تولید شد. پس از ارزیابی مدل‌ها در دوره پایه و انتخاب مدل مناسب برای برازش، با استفاده از از منحنی تیلور

7-Climate Model data for Hydrologic modeling

6-Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

اجتماعی اقتصادی مانند رشد جهانی-جمعیت، توسعه اقتصادی و پیشرفت‌های فناوری استفاده شد.

تلفیق سناریوهای اجتماعی اقتصادی و سناریوهای واداشت تابشی نماینده غلظت گازهای گلخانه‌ای برای تحلیل پس‌خورهای میان تغییر اقلیم و عامل‌های



شکل ۲- روندنمای ساخت لایه فرساینده باران برای آینده نزدیک (۱۴۲۵).

Figure 2- Process of Creating the Rainfall Erosivity Layer for the Near Future (2046).

استفاده شد. ابتدا از میان مدل‌های سری CMIP6، مدل‌هایی که داده‌هایی با دوره‌های مشترک تاریخی و پیش‌نگری داشتند و تفکیک مکانی افقی ۲۵۰ کیلومتر و دقیق‌تر داشتند، بررسی شدند (جدول ۲). کارایی هر یک از مدل‌های در دسترس CMIP6 با مقایسه داده‌های تاریخی آن‌ها با داده‌های بازکاوی با رسم نمودار تیلور مشخص شد (تیلور ۲۰۰۱). نمودار تیلور شامل مشخصه‌های نمایه‌های اربیبی، انحراف معیار و جذر میانگین مربعات است.

به دلیل سهولت در دریافت، امکان برش زمانی و مکانی داده‌ها، داده‌های مدل‌های CMIP6 از پایگاه کوپرنیکوس^۸ دریافت شد.

در این پژوهش از داده‌های بارش مدل‌های MIROC6، ACCESS-CM2، CNRM-CM6 با تفکیک مکانی افقی ۲۵۰ کیلومتر و ۵۰۰ کیلومتر در دو بازه تاریخی (۲۰۱۴ - ۱۹۸۵)، آینده (۲۰۱۰ - ۲۰۱۵) با سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به‌عنوان سناریوهای خوش‌بینانه، متوسط و بدبینانه

8-<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip6>

جدول ۲- مدل‌های CMIP6 با داده‌های بارش در دسترس پس از غربال‌گری داده‌های مشترک سه سناریوی SSP تاریخی.

Table 2- CMIP6 Models with Available Precipitation Data after Screening Common Data for Three SSP Scenarios and Historical Period.

variant	SSP5_8.5	SSP2_4.5	SSP1_2.6	HIS	RESOLUTION		Model
					500	250	
<i>r1i1p1f1</i>	■	■	■	■		*	MIROC6
<i>r1i1p1f1</i>	■	■	■	■		*	ACCESS-CM2
<i>r1i1p1f1</i>	■	■	■	■	*		CAN5
<i>r1i1p1f1</i>	■	■	■	■		*	CNRM-CM6

در بخش پردازش، داده‌های ورودی شامل داده‌های دیدبانی و مدل اقلیمی پردازش شده و ریزمقیاس‌نمایی می‌شوند و در بخش رسم، خروجی‌ها رسم می‌شوند. بخش پردازش به چهار زیر بخش اصلی شامل ورودی داده‌های دیدبانی، ورودی مدل اقلیمی، انتخاب دایرکتوری خروجی‌های ریزمقیاس‌نمایی شده و فرایند اجرای مدل تقسیم می‌شود. در نرم‌افزار CMHyd شکل داده‌های ورودی می‌تواند ASCII یا netcdf باشد. کمبود داده‌های آماری با کد ۹۹/۹ یا ۹۹/۰ نشان داده می‌شوند. در تمامی مراحل ریزمقیاس‌نمایی، داده‌های تاریخی و آینده باید در سال‌های کیبسه به ۳۶۶ روز تبدیل شوند.

ریزمقیاس‌نمایی به‌وسیله CMHYD

برای ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های گردش عمومی جو از نرم‌افزار CMHYD استفاده شد. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی آب‌شناسی به‌وسیله رادجنز و همکاران (۲۰۱۶) در دانشگاه پردو آمریکا و با زبان پایتون توسعه داده شده است. در فرایند تصحیح اریبی الزاماً کاهش مقیاس انجام نمی‌شود و تفکیک مکانی داده‌های تصحیح شده با داده‌های خام مشابه است. اجرای سریع، امکان انتخاب گزینه‌های گوناگون و امکان ریزمقیاس‌نمایی بارش (۵ روش) و دما (۴ روش) از مزایای این نرم‌افزار است. نرم‌افزار CMHyd از دو بخش اصلی پردازش و رسم تشکیل شده است.

جدول ۳- روش‌های اختصاصی ریزمقیاس‌نمایی آماری برای بارش و دما در نرم‌افزار CMHyd (رادجنز و همکاران ۲۰۱۶).

Table 3- Specific Statistical Downscaling Methods for Precipitation and Temperature in the CMHYD Software (Rathjens et al 2016).

Temperature	Precipitation	Downscaling method
	✓	Linear Scaling (multiplicative) (LS)
✓		Linear Scaling (additive) (LS)
	✓	Delta-Change correction (multiplicative) (DC)
✓		Delta-Change correction (additive) (DC)
	✓	Precipitation Local Intensity scaling (LI)
	✓	Power Transformation of precipitation (PT)
✓		Variance Scaling of temperature (VS)
✓	✓	Distribution Mapping of precipitation and temperature (DM)

نتایج و بحث

نتایج بررسی مدل‌ها

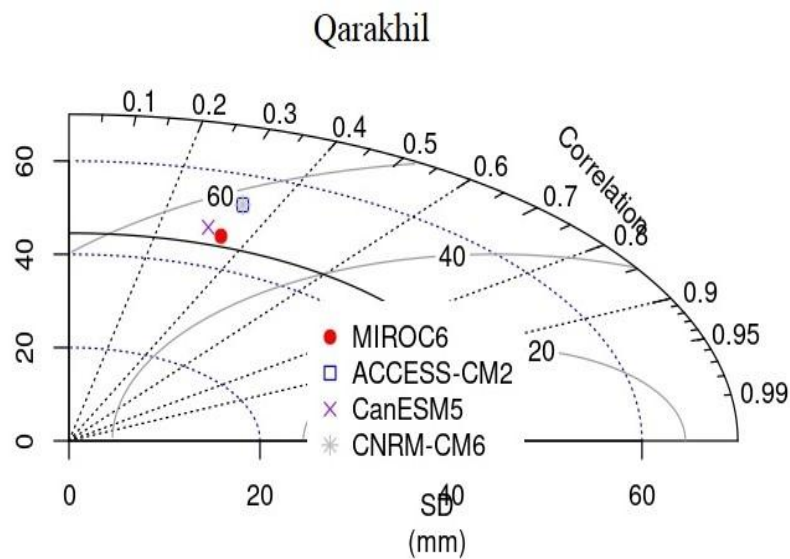
از این‌رو، اگرچه مدل Can5 نتایج قابل قبول و همبستگی زیادی با داده‌های مشاهده‌ای نشان داد، اما با توجه به قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر انتخاب نشد. تغییرات بارندگی در دوره آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم

تغییرات بارندگی تحت تأثیر تغییر اقلیم در سناریوهای اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در آینده نزدیک (۲۰۴۶-۲۰۱۵) و آینده میانه (۲۰۷۵-۲۰۴۷) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج این پژوهش تا سال ۲۱۰۰، روند بارندگی با سناریوی SSP1-2.6 افزایشی است. انتظار می‌رود در سناریو اقلیمی SSP5-8.5 و SSP2-4.5، روند بارندگی در آینده نزدیک تا آینده میانه کاهش باشد، اگرچه این کاهش در آینده دور کمتر برآورد شد. همچنین، در ایستگاه آلاشت با سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 برای آینده نزدیک و میانه تغییرات قابل توجهی مشاهده نشد.

پس از ریزمقیاس‌نمایی شاخص اقلیمی بارش به شکل ماهانه، مدل مناسب با توجه به نمودار تیلور برای ایستگاه‌ها انتخاب شد (شکل ۳ (به عنوان نمونه) و جدول ۴). به منظور ارزیابی و مقایسه کارایی مدل از میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2)، ضریب نش-ساتکلیف (NSE) و همبستگی (R) استفاده شد (عظیمی‌سرداری و همکاران ۲۰۱۹). مدل MIROC6 با استفاده از روش ریزمقیاس‌نمایی (LI) در مقایسه با دیگر روش‌ها عملکرد بهتری داشته و نتایج قابل توجهی را ارائه داده این مدل با بیشترین ضریب نش-ساتکلیف (NSE)، کمترین خطای میانگین مربعات ریشه (RMSE) و بهترین همبستگی مکانی و سنجه‌های آماری خطا، بهترین عملکرد را نشان داد. این یافته با نتایج پژوهش‌های قانع و همکاران (۲۰۲۳) همخوانی دارد. انتخاب مدل مناسب برای هر آبخیز، به‌ویژه با توجه به تغییرپذیری شدید منطقه، باعث دستیابی به نتایج قابل اعتمادتر می‌شود (ستودهیان و همکاران ۲۰۲۲).

جدول ۴- ارزیابی روش‌های ریزمقیاس‌نمایی بارش ایستگاه‌ها.

Table 4- Evaluation of Downscaling Methods for Station Precipitation.					
R ²	R	RMSE	NSE	Method	Station
1	1	0.0029	0.99	LS	Qharakhil
1	1	0.0021	1	PT	
1	1	0.0005	1	LI	
1	0.99	0.90	0.99	DM	
1	1	0.15	0.93	LS	Sang Deh
1	0.99	0.15	0.93	PT	
1	1	0.15	0.93	LI	
0.99	0.96	0.9	0.82	DM	
1	1	0.002	1	LS	Shirgah
1	1	0.002	1	PT	
1	1	0.0006	1	LI	
0.99	0.99	0.59	0.99	DM	
0.004	0.69	0.2	0.25	LS	Pol Sefid
1	1	0.001	1	PT	
1	1	0.009	1	LI	
0.99	0.99	0.32	0.99	DM	
1	1	0.002	1	LS	Alasht
1	1	0.001	1	PT	
1	1	0/002	1	LI	
0.97	0.98	0.63	0.97	DM	



شکل ۳- نمودار تیلور ایستگاه قراخیل.

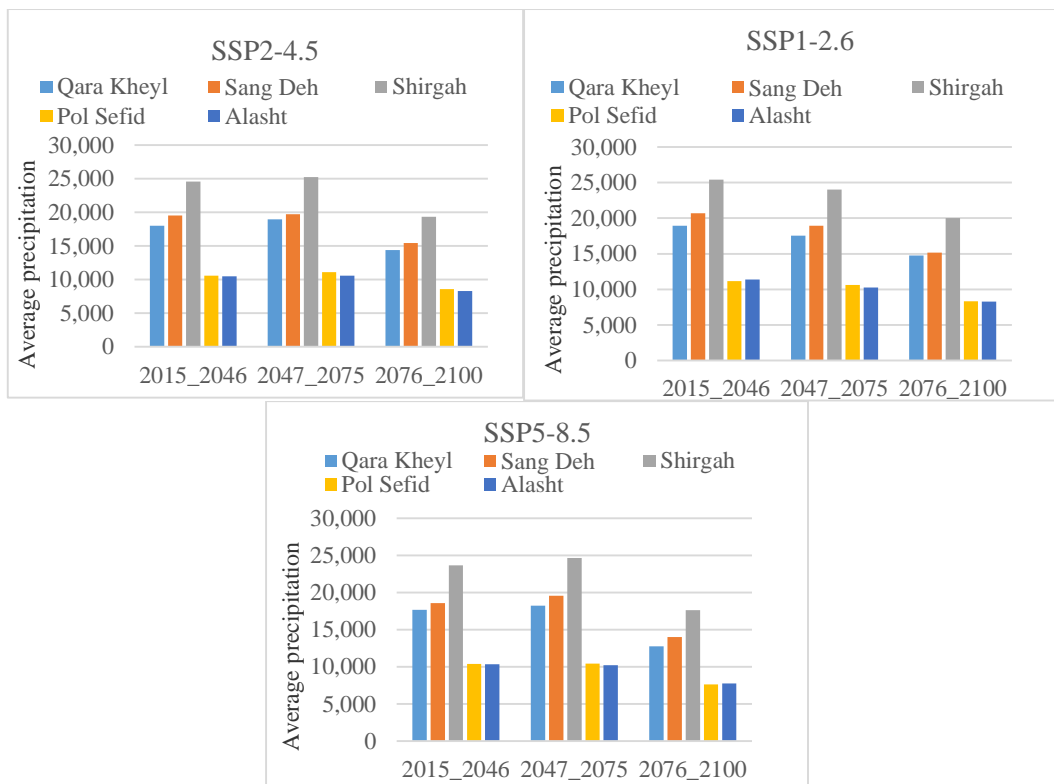
Figure 3- Taylor Diagram for Qarakhil Station.

نزدیک با سناریوی خوش‌بینانه SSP1-2.6 و بدبینانه SSP5-8.5 در بیشتر ایستگاه‌ها افزایشی بود. درصد این افزایش در سناریوی خوش‌بینانه بیشتر از سناریوی بدبینانه بود و در سناریوی متوسط SSP2-4.5 روند اندازه‌های بارش، کاهشی بود. با مقایسه میانگین بارش ایستگاه‌ها و اندازه‌های پیش‌بینی شده مشخص شد با هر سه سناریوی اقلیمی، بارش ایستگاه

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، اندازه باران برای آینده نزدیک (سال ۱۴۲۵) میانگین بارش آبخیز با سناریوهای اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۴۳/۳، ۳۸/۶، ۱/۲۸٪ تغییر کرد. به‌منظور درک بهتر تغییرات اندازه‌های بارندگی آینده نزدیک و میانگین بارندگی ایستگاه‌های آبخیز برآورد شد (جدول ۵). بر پایه داده‌های جدول ۵، روند بارش در آینده

2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۸۹۶ و ۳۸۳/۷ و ۶۳۳ میلی‌متر تغییر کرد (شکل ۵).

پل سفید در آینده کاهش خواهد یافت. میانگین بارندگی در آینده نزدیک با سناریوهای اقلیمی SSP1-2.6



شکل ۴- تغییرات بارندگی آینده نزدیک، میانه و دور برای سه سناریوی خوش‌بینانه، بدبینانه و متوسط در ایستگاه‌های آبخیز تالار.

Figure 4- Future Changes in Near-Median and Far Rainfall for Optimistic, Pessimistic, and Intermediate Scenarios at Stations in the Talar Watershed.

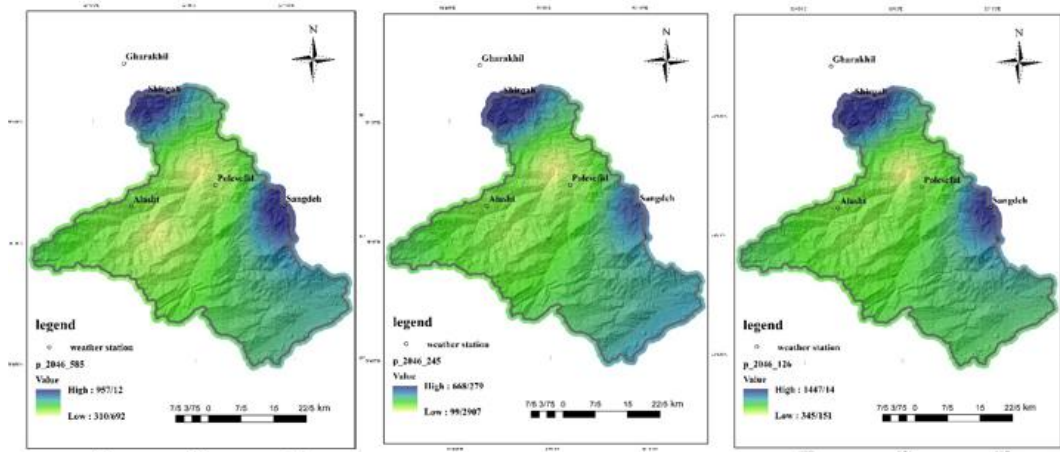
جدول ۵- اندازه‌های بارش میانگین دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) و آینده (۲۰۴۶) ایستگاه‌های آبخیز تالار.

Table 5- Average Precipitation Values for the Base Period (1985-2014) and Future (2046) at Stations in the Talar Watershed.

Pessimistic SSP5-8.5	Moderate SSP2-4.5	Optimistic SSP1-2.6	Average precipitation (mm)	Station Name
730.2	458.4	757.1	591.99	Qharakhil
945.1	474.6	1129.2	863.5	Sang Deh
957.1	668.3	1447.1	1036.1	Shirgah
401.2	187.1	557.6	600.4	Pol Sefid
458.1	206.6	539.5	532.8	Alasht

میلی‌متر بر هکتار سال) در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) با سناریوهای اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب به ۴۲۲، ۲۲۷ و ۳۲۲ (مگاژول میلی‌متر بر هکتار سال) تغییر کرد. بر اساس نتایج این پژوهش در آینده نزدیک فقط در سناریوی خوش‌بینانه فرساینده‌گی باران ۱۶/۸۹٪ افزایش یافت.

شاخص فرساینده‌گی باران در دوره آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم فرساینده‌گی باران آینده نزدیک آبخیز با سناریوهای اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۱۶/۸۹، ۳۷/۱۲، -۱۰/۸۰٪ برآورد شد (شکل ۶). میانگین فرساینده‌گی آبخیز معادل ۳۶۱ (مگاژول

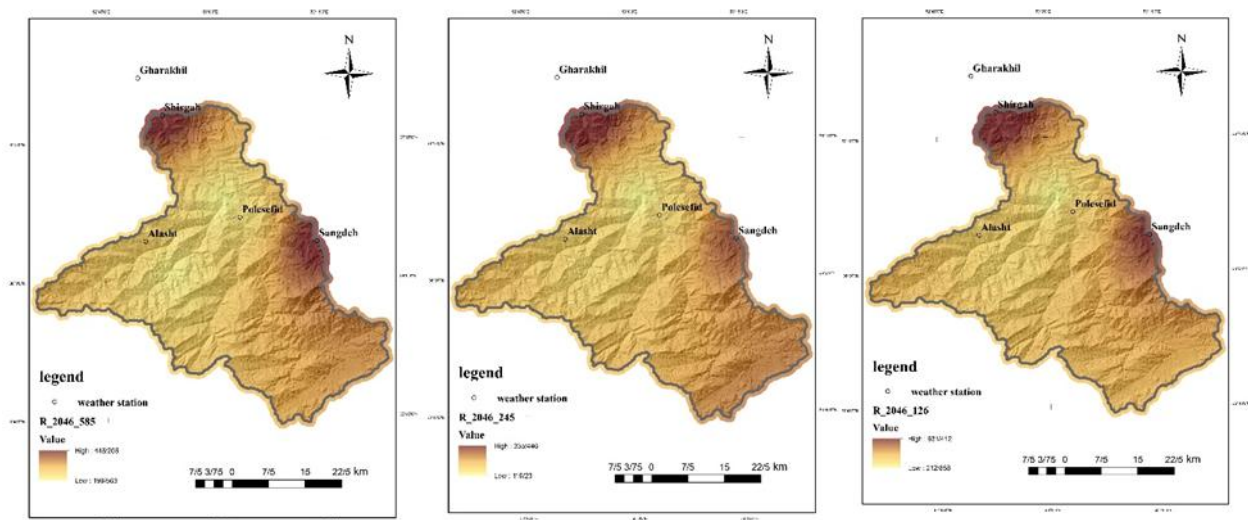


شکل ۵- نقشه میانگین بارش سال ۱۴۲۵ آبخیز تالار بر اساس سناریوهای خوش‌بینانه SSP1-2.6، متوسط SSP2-4.5 و بدبینانه SSP5-8.5

Figure 5- Map of Average Precipitation in the Year 2046 for the Talar Watershed Based on Optimistic (SSP1-2.6), Moderate (SSP2-4.5), and Pessimistic (SSP5-8.5) Scenarios.

در مقایسه با دوره پایه موجب افزایش ۱۶/۸۹٪ فرسایندهای باران شد. افزایش فرسایندهای باران می‌تواند در دوره‌های خشک و مرطوب سبب افزایش تولید رسوب و فرسایش خاک شود (نظری‌سامانی و همکاران، ۲۰۱۹). در سناریوی متوسط (SSP2-4.5) و بدبینانه (SSP5-8.5)، به ترتیب با کاهش ۳۸/۶٪ و ۱۲/۲۸٪ بارش آبخیز، فرسایندهای باران در مقایسه با دوره پایه ۳۷/۹٪ و ۱۰/۸۰٪ کاهش یافت. انتظار می‌رود افزون بر اندازه بارش، نوع و شدت بارش‌ها نیز تغییر یابد که می‌تواند بر پوشش گیاهی و منابع آب و خاک آبخیز اثرات منفی داشته باشد (جیا و همکاران ۲۰۲۰). اگرچه در ایستگاه سنگده، انتظار می‌رود پوشش جنگلی راش در بالادست افزایش فرسایندهای ناشی از باران را تا حدی خنثی کند، اما هم‌اکنون آبخیز تالار به دلیل تغییرات شدید کاربری زمین‌ها و نابودی و فرسایش خاک و ساخت و ساز در مناطق کوهستانی و جاده‌سازی به شدت در معرض فرسایش‌پذیری است (وهاب‌زاده و احمدی ۲۰۲۲). بر اساس نتایج این پژوهش، انتظار می‌رود که با کاهش بارش و فرسایندهای باران به ویژه در مناطق میان‌بند و بالادست که کاربری عمده آن جنگل و مرتع است (از جمله شهرستان سوادکوه).

تأثیر تغییر اقلیم بر بارش و فرسایندهای باران نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات بارش در آینده نزدیک (سال ۱۴۲۵) با سناریوهای گوناگون تغییر اقلیم در ایستگاه‌های مختلف آبخیز (قراخیل، سنگده، شیرگاه، پل سفید، آلاشت) تفاوت‌های چشمگیری داشت. در سناریوی خوش‌بینانه (SSP1-2.6)، بارش در مقایسه با دوره پایه افزایش یافت؛ بیشترین افزایش در ایستگاه قراخیل (۴۵٪) و کمترین در ایستگاه آلاشت (۱۲۶٪) مشاهده شد. این افزایش بارش، به ویژه در ایستگاه‌های پست مانند قراخیل، می‌تواند موجب افزایش خطر آبگرفتگی و سیلاب شود. در سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5)، تغییرات بارش در ایستگاه‌های جنوبی و جنوب‌شرقی (شیرگاه، پل سفید و آلاشت) کاهش و در دامنه‌های غربی و جنوب‌غربی و مناطق پست آبخیز (قراخیل و سنگده) افزایش یافت. می‌توان گفت تفاوت در بلندی، پستی‌بلندی و موقعیت ایستگاه‌ها در دامنه، موجب تفاوت در اندازه‌های بارش دریافتی ایستگاه‌ها شد. این یافته با نتایج پژوهش نیرینگ و همکاران (۲۰۰۴) هم‌خوانی دارد. بر اساس مدل استفاده‌شده، تغییرات فرسایندهای باران تابعی از تغییرات بارندگی سالانه بود. برای آینده نزدیک در سناریوی خوش‌بینانه (SSP1-2.6)، افزایش ۴۳٪ بارش



شکل ۶- نقشه فرساینده‌گی باران سال ۱۴۲۵ آبخیز تالار بر اساس سناریوهای خوش‌بینانه SSP1-2.6، متوسط SSP2-4.5 و بدبینانه SSP5-8.5

Figure 6- Map of Rainfall Erosivity in the Year 2046 for the Talar Watershed Based on Optimistic (SSP1-2.6), Moderate (SSP2-4.5), and Pessimistic (SSP5-8.5) Scenarios.

می‌تواند خطرات جدی همچون حمله آفات و رخداد آتش‌سوزی‌های مهیب را به دنبال داشته باشد و تهدیدی جدی برای امنیت غذایی و معیشت ساکنان منطقه باشد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یافته‌های این پژوهش نشان داد که تغییرات اقلیمی تأثیرات مهمی بر منابع طبیعی و معیشت ساکنان آبخیز تالار دارند. با توجه به کاهش پیش‌بینی شده بارش و قرارگیری بخش‌هایی از آبخیز در بلندی‌های بالادست، اجرای اقدامات بیدرنج برای مدیریت پایدار منابع آب و خاک ضروری است. در این راستا، پیشنهاد می‌شود از روش‌های نوین آبیاری، تغییر الگوی کشت، استفاده از گونه‌ها و نژادهای کم‌آب‌بر و بازچرخانی آب منطقه بهره‌برداری شود. همچنین، کاهش بارش و پوشش گیاهی می‌تواند به افزایش فرسایش منجر شود که نیازمند پژوهش و بررسی است. نتایج نشان داد که نوع و اندازه پوشش گیاهی تأثیر زیادی در جلوگیری از فرسایش دارد. به طوری که در سطح آبخیز خطر فرسایش در مناطق با پوشش جنگلی متراکم در مقایسه با مناطق با پوشش مرتعی و دامنه‌های با شیب بسیار تند و بدون پوشش، کمتر بود. همچنین در بخش مرتعی

پوشش گیاهی کاهش یابد. همچنین، افزایش ساخت و ساز و ایجاد سطوح نفوذناپذیر در مناطق پل سفید و شیرگاه موجب کاهش پوشش گیاهی و آسیب‌پذیری بیشتر نسبت به بارندگی‌های شدید در آینده شود.

همچنین، در مناطق مرتفع و پر باران، مانند شهرستان سوادکوه، کاهش فرساینده‌گی باران و بارش پیش‌بینی شده تأثیرات قابل توجهی در تغییرات کاربری اراضی و تولید رسوب خواهد داشت.

در راستای این تغییرات، انجام اقدامات آبخیزداری، به‌ویژه با تأکید بر احیای پوشش گیاهی و استفاده از روش‌های سازهای در آبراهه‌های فرعی، می‌تواند به‌طور چشمگیری فرسایش را در دهه‌های آینده کاهش دهد. همچنین، کشت گیاهان مقاوم با عملکرد زیاد (مانند درختان افرا، ممرز، راش، توسکا و سپیدار) در بخش‌های جنگلی و گیاهان بوته‌ای و علفی (مانند شبدر، یونجه و چمن یک‌ساله) در بخش‌های مرتعی می‌تواند تأثیرات منفی فرساینده‌گی باران را کاهش دهد (عرب‌خدری و همکاران ۲۰۲۰).

در نهایت، با توجه به کاهش بارش پیش‌بینی شده در بخش‌های میان‌بند و بالادست آبخیز تالار، که پوشش جنگلی انبوه و خاک حاصلخیز بود، این تغییرات

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده‌شده در این پژوهش با مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

شمیم احمدی: مفهوم‌سازی اولیه - نگارش نسخه اولیه مقاله

عطاالله کاویان: مشاوره، نظارت، بازبینی متن، روش‌شناسی

کریم سلیمانی: راهنمایی، بررسی نتایج، تحلیل آماری

کاکا شاهی: تحلیل آماری

عبدالواحد خالدی‌درویشان: راهنمایی، تحلیل‌های

نرم‌افزاری/آماري، بررسی نتایج، تحلیل آماری

آبخیز (بخش میان‌بند و بالادست)، نظارت بیشتر بر اجرای طرح‌های مرتع‌داری مانند قرق، بذرپاشی، مدیریت دام و رعایت ظرفیت چرا ضروری است. داده‌های پیش‌بینی‌شده فرسایش باران می‌تواند در توسعه پژوهش‌ها و سیاست‌گذاری‌های مرتبط با فرسایش خاک و تغییرات اقلیمی مؤثر باشد. همچنین، بررسی تغییرات شدت بارندگی در آبخیز در پژوهش‌های آتی ضروری است. پیشنهاد می‌شود با توجه به این که در کشور ایران داده‌های مناسب با پراکنش کافی در دسترس نیست، از مدل‌های با پیکسل اندازه کوچک‌تر استفاده شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

فهرست منابع

- Ahmadi H, Javadi M, Salavati A. 2014. Zonation of rainfall erosivity strength using furnier method and some interpolation techniques (Case study: Ghazvin Province). *Natural Ecosystems of Iran*. 5(2): 1-14. (In Persian). <https://sid.ir/paper/215292/fa>
- Arabkhedri M, Asadi H, Eslami F, Gerami Z, Vazifehdooost M. 2020. Application of vegetation cover seasonality. temporal variation of rainfall erosivity and sediment yield for land utilization planning. *Journal of Water and Soil Conservation*. 27(5): 217-232. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2021.18005.3362>
- Azimi Sardari MR, Bazrafshan O, Panagopoulos T, Sardooi ER. 2019. Modeling the impact of climate change and land use change scenarios on soil erosion at the minab dam watershed. *Sustainability*. 11(12): 3353. <https://doi.org/10.3390/su11123353>
- Babaeian I, Modirian R, Khazanedari L, Karimian M, Kouzegaran S, Kouhi M, Falamarzi Y, Malbusi S. 2023. Projection of iran's precipitation in 21st century using downscaling of selected cmip6 models by cmhyd. *Journal of the Earth and Space Physics*. 49(2): 431-449. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.332410.1007436>
- Babaeian I, Najafinik Z, Zabol Abbasi F, Adab H, Malbousi Sh. 2010. Climate change assessment over iran during 2010-2039 by using statistical downscaling of echo-g model. *Journal of Geography and Development*. 7(16): 135-152. (In Persian). <https://doi.org/10.22111/gdij.2009.1179>
- Babu R, Dhyani B, Kumar NK. 2004. Assessment of erodibility status and refined iso-erodent map of Indian. *Journal of Soil Conservation*. 32(3): 171-177.
- Benavidez R, Jackson B, Maxwell D, Norton K. 2018. A review of the (revised) universal soil loss equation (rusle) with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*. 22(11): 6059-6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>
- Doulabian S, Golian S, Toosi AS, Murphy C. 2020. Evaluating the effects of climate change on precipitation and temperature for iran using rcp scenarios. *Journal of Water and Climate Change*. 12(1): 166-184. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.114>
- Eslami H. 2020. Evaluation of spatio-temporal variations of rainfall erosivity index using cokriging method in Khouzestan province. *Water Engineering*. 8(3): 2228-5784. (In Persian). https://jwe.shoushtar.iau.ir/article_686786.html
- Fallah Kalaki M, Shokri Kuchak V, Ramezani Etedali H. 2021. Simulating the effects of climate

change on runoff using the cmip5 and cmip6 climate models by swat hydrological model (Case study: Tashk-bakhtegan Basin). *Iran-Water Resources Research*. 17(3): 345–359. (In Persian).

<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1400.17.3.20.5>

Ghane MR, Motevalli S, Janbaz Ghobadi GR, Kouhi M. 2023. Evaluation of the ability of three statistical methods to downscale the output of temperature and precipitation of cmip6 models in the kashfrud basin. *Journal of Climate Research*, 1402(53): 117–132. (In Persian).

Gholami A, Shahedi K, Habibneghad M, Vafakhah M, Solymani K. 2017. Forecasting and comparison of future climate change by using of GCM Models under different scenarios in Talar Watershed of Mazandaran Province. *Journal of Range and Watershed Management*, 70(1): 181–196. (In Persian).

<https://doi.org/10.22059/jrwm.2017.61975>

Haji K, Khaledi Darvishan A, Mostafazadeh R. 2023. Spatiotemporal variations of the rainfall erosivity with considering snow cover correction coefficient in the iranian part of the Caspian Sea Basin. *Watershed Management Research*. 36(3): 70-89. (In Persian).

Hong J, Javan K, Shin Y, Park JS. 2021. Future projections and uncertainty assessment of precipitation extremes in iran from the Cmp6 ensemble. *Atmosphere*. 12(8): 1052. <https://doi.org/10.3390/atmos12081052>

Hosseini M, Jafari H, Solari F. 2011. Determination of organochlorine pesticides in river waters in talaar and tajan rivers. *Regional Water Company Mazandaran*. pp. 122–126. (In Persian).

<https://doi.org/10.22092/wmrj.2023.359311.1484>

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. AR5 Synthesis report: Climate change 2014 IPCC. Contribution of working groups i, ii and iii to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Core Writing Team, Pachauri R.K, and Meyer L.A, (eds.)]. Geneva Switzerland. 151 p. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

Jain MK, DAS D. 2010. Estimation of sediment yield and areas of soil erosion and deposition for watershed prioritization using gis and remote sensing. *Water Resources Management*. 24(10):2091–2112.

<https://doi.org/10.1007/s11269-009-9540-0>

Jia L, ZhanBin L, GoCe X, ZongPing R, Peng L, Ting cheng Yu, YiXin Z, Bin W, JiaXin Z, Shu Y. 2020. Dynamic change of vegetation and its response to climate and topographic factors in the xijiang river basin. *China. Journal of*

Environmental Science and Pollution Research. 27(11):11637–11648.

<https://doi.org/10.1007/s11356-020-07692-w>

Khademalrasoul A, Amerikhah H. 2022. Forecasting of short-term and mid-term variations of rainfall erosivity index using sarima. *Journal of Agricultural Engineering*. 45(1):79-95. (In Persian).

<https://doi.org/10.22055/agen.2022.39147.1621>

Koohshahi FM, Akbarian M, Khorani A. 2023. Evaluation of climate change effects on rainfall erosivity factor in minab watershed. Ninth Conference of the Iranian Geomorphology Association. (In Persian).

<https://civilica.com/doc/1687633/>

Li X, Xiao P, Hao S, Wang Z. 2024. Rainfall erosivity characteristics during 1961–2100 in the loess plateau. *China. Journal of Remote Sensing*, 16(4):661. <https://doi.org/10.3390/rs16040661>

Ma Y, Sun D, Niu Z, Wang X. 2023. Contribution of climate change and human activities to runoff and sediment discharge changes based on budyko theory and water–sediment relationships during 1960–2019 in the Taohe River Basin. *China. Journal of Atmosphere*, 14(7): 1144. <https://doi.org/10.3390/atmos14071144>

Malboosi S, Abbasi F, Pakdaman M, Javanshiri Z. 2023. Investigation of changes in the extreme of temperature and precipitation in iran in the last 60 years. *Journal of Climate Research*. 14(54): 157–172. (In Persian).

Mohammadi M, Fallah M, Kavian A, Gholami L, Omidvar E. 2016. The application of RUSLE model in spatial distributiondetermination of soil loss hazard Iranian. *Journal of Ecohydrology*. 3(4): 645–658. (In Persian).

<https://doi.org/10.22059/ije.2016.60368>

Nazari Samani A, Zarrin B, Khalighi Sigaroudi S. 2019. The role of climate variability on spatio-temporal of rainfall erosivity (Case study: Fashand drainage basin). *Journal of Range and Watershed Management*. 72(1): 279–290. (In Persian).

<https://doi.org/10.22059/jrwm.2019.126934.886>

Nearing MA, PRUSKI F, O'NEAL MR. 2004. Expected climate change impacts on soil erosion rates a review. *Journal of Soil and Water Conservation*. 59(1): 43–50.

Panagos P, Borrelli P, Matthews F, Liakos L, Bezak N, Diodato N, Ballabio C. 2022. Global rainfall erosivity projections for 2050 and 2070. *Journal of Hydrology*. 610(1): 127865. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127865>

Patriche CV, Roșca B, Pîrnău RG, Vasiliniuc I, Irimia LM. 2023. Simulation of rainfall erosivity dynamics in romania under climate

change scenarios. Sustainability. 15(2): 1469 p. <https://doi.org/10.3390/su15021469>

Piani C, Weedon GP, Best M, Gomes SM, Viterbo P, Hagemann S, Haerter JO. 2010. Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. Journal of Hydrology. 395(3):199–215.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.024>

Rathjens H, Bieger K, Srinivasan R, Chaubey I, Arnold JG. 2016. CMhyd user manual documentation for preparing simulated climate change data for hydrologic impact studies (User manual).

https://swat.tamu.edu/media/115265/bias_cor_man.pdf.

Research Project by the Regional Water Company Mazandaran. 2009. Optimization studies of water resource atlas in mazandaran and east gilan basins. Rivers between Sefidrud and Gharesoo, Volume 1. (Part1) (1): 276–277. (In Persian). <https://www.glrw.ir/st/77>

Shokohideh H, Vafakhah M, Zare S, Chamani R. 2022. Evaluation of the variability of the rain erosion index under the influence of climatic scenarios in the afin watershed of south

khorestan. The Fourth National Conference of Hydrology of Iran, 14 p. (In Persian). <https://civilica.com/doc/1544702/>.

Sotoudeheian S, Jalilvand E, Kermanshah A. 2022. Using high-resolution climate models to identify climate change hotspots in the middle east (Case study: Iran). Climate, 10(11): 161. <https://doi.org/10.3390/cli10110161>.

Takhellambam BS, Srivastava P, Lamba J, McGehee RP, Kumar H, Tian D. 2023. Projected mid-century rainfall erosivity under climate change over the southeastern united states. Science of The Total Environment. 865(C2023): 161119.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161119>

Tavangar S, Moradi H, Massah Bavani A, Azari M. 2016. Forecasting climate change impact on rainfall erosivity factor in the southern coast of caspian sea. Watershed Engineering and Management, 8(4): 414–424. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2016.107178>

Taylor KE. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. Journal of Geophysical Research, 106 (D7):7183–7192.



Predicting the Effect of Climate Change on Rainfall Erosivity in the Talar Watershed of Mazandaran Province, Iran

Shamim Ahmadi¹, Ataollah Kavian^{2*}, Karim Soleimani³, Kaka Shahidi⁴, Abdul Vahid Khalidi Darwshan⁵

- 1- Ph.D. Student in Watershed Management, Department of Watershed Management, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari
- 2, 3 and 4 - Professor, Department of Watershed Management, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari
- 5- Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor

Extended Abstract

Introduction and Goal

Climate change is one of the major environmental challenges, with extensive impacts on both natural and human processes. These changes can affect hydrological cycles, leading to alterations in rainfall patterns and soil erosion. Rising temperatures and variations in the amount and intensity of precipitation may have detrimental effects on the stability of water and soil resources. Decrease in precipitation in some areas and an increase in others will alter the spatial and temporal distribution of runoff, which can impact the storage capacity of surface and groundwater resources. Given the importance of natural resource management and the need to predict the consequences of climate change, This study investigates the effects of climate change on precipitation and rainfall erosivity in the Talar watershed. The main objective of the present research is to evaluate the effects of three climate scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 on precipitation and rainfall erosivity in the near future year 2046. By forecasting climate change in the near future 2046, we can prepare for its short-term impacts, such as water scarcity, droughts, and floods, and to carry out necessary planning in this areas of water and soil resource management, agriculture, and infrastructure development of appropriate measures for adapting to climate change. Additionally, the analysis of climatic changes will assist policymakers in making more effective decisions when designing and implementing long-term sustainable development programs.

Article Type: Research Article

***Corresponding Author E-mail:** a.kavian@sanru.ac.ir

Citation: Ahmadi, Sh., Kavian, A., Soleimani, K., Shahidi, K., Khalidi darwshan, A. 2025. Predicting the Effect of Climate Change on Rainfall Erosivity in the Talar Watershed of Mazandaran Province, Iran. *Watershed Management Research*. 38(1): 78-95.

DOI: 10.22092/wmrj.2024.366200.1588

Received: 26 June 2024, **Received in revised form:** 08 August 2024, **Accepted:** 21 September 2024

Published online: 21 March 2025

Watershed Management Research, Vol.38, No.1, Ser. No:146, Spring 2025, pp. 78-95.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



Materials and Methods

The methodology of this research includes using precipitation data from five stations (Qharakhil, Sang Deh, Shirgah, Pol Sefid, and Alasht) in the study area for the period 1985–2014. Subsequently, near-future precipitation was simulated using climate model data from CMIP6, including MIROC6, ACCESS_CM2, CAN5, and CNRM_CM6, along with the CMHYD downscaling software. The selection of the best model for downscaling precipitation was based on a comparison of the results from various models with observational data. Metrics such as Root Mean Square Error (RMSE), coefficient of determination (R^2), Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), Pearson correlation coefficient (R), and Taylor diagram were used to evaluate and compare the simulation models. The results indicate that the MIROC6 model with the LI method has the best performance in simulating precipitation and rainfall erosivity in the Talar watershed. The Rain Erosivity Index (R) was calculated for both the baseline and future periods, and its variations under different scenarios were examined. Additionally, Geographic Information Systems (GIS) were utilized to analyze the spatial and temporal changes in rainfall and rainfall erosivity. These analyses helped identify vulnerable regions, which were subsequently considered in management planning.

Results and Discussion

The results indicated that rainfall variations under the influence of climate change differ across various scenarios. The research findings suggest that in the future, under the optimistic SSP1-2.6 scenario, a 43% increase in precipitation leads to a 16.89% increase in rainfall erosivity. This increase could have different effects on soil erosion during dry and wet periods. Specifically, in wet periods, it leads to increased soil erosion, while in dry periods, it alters the runoff pattern. In the moderate SSP2-4.5 and pessimistic SSP5-8.5 scenarios, precipitation decreases by 38.6% and 1.28%, respectively, resulting in corresponding reductions of 37.9% and 10.8% in rainfall erosivity. The results of spatial analysis reveals that reduced precipitation and rainfall erosivity in forested and rangeland areas. Additionally, in residential areas like Pol Sefid, increased construction and the creation of impervious surfaces lead to reduced vegetation cover and increased vulnerability to intense rainfall. In areas like Shirgah, increased precipitation and rainfall erosivity could elevate the risk of landslides and erosion in road trenches. These changes can have significant impacts on soil erosion and water resource management in the region. In this regard, the necessity of adopting protective measures and continuously monitoring climate variations in the area is emphasized.

Conclusion and Suggestions

Overall, the findings highlight that climate change can significantly impact natural resources and livelihoods in the Talar watershed. Urgent actions, including the sustainable management of water and soil resources, are necessary for adaptation to these changes. Such actions involve monitoring livestock grazing in pastures, protecting vegetation cover, and cultivating erosion-resistant plants and developing watershed management techniques. It is also recommended to mitigate the damages caused by intense rainfall by employing appropriate vegetation cover in erosion-prone areas, monitoring vegetation cover changes, and implementing erosion control measures in watersheds. The outcomes of this research can assist policymakers and natural resource managers in making informed decisions to mitigate the adverse effects of climate change and improve the management of water and soil resources. Additionally, projected data on the future erosion by rainfall can be used for the further research development and strategic planning in watershed management. Furthermore, it is recommended that future research examine changes in rainfall intensity and their impact on soil erosion. Additionally, conducting field studies and utilizing advanced numerical models can enhance the accuracy of predictions and contribute to the development of effective strategies for climate change management.

Keywords: Climate Change, Cmhyd, cmip6, precipitation

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

Shamim Ahmadi 1: Writing - original draft preparation

Ataollah Kavian 2: Visualization, Supervision, Conceptualization, methodology

Karim Soleimani 3: Resources, Manuscript editing, Formal analysis and investigation

Kaka Shahidi 4: Formal analysis and investigation

Abdul Vahid Khalidi Darwshan 5: Visualization, Supervision, Conceptualization, methodology.



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مجله تحقیقات آموزش و پژوهش‌های آبخیزداری

بازآفرینی شاخص پایداری آبخیز بر اساس چارچوب محرک-فشار-وضعیت-اثر- پاسخ در آبخیز بهشت‌آباد

رفعت زارع‌بیدکی^{۱*}، شاهین درخشان^۲، سیامک خیبری^۳، هنریک چاوز^۴

۱- دانشیار دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، ایران

۲- دانشجوی دکتری دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، ایران

۳- استادیار دانشگاه شفیلد، انگلستان

۴- استاد دانشگاه برازیلیا، برزیل

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

آبخیزهای سالم خدمات زیست‌بومی بسیاری در زمینه‌های گوناگون اجتماعی و رفاه اقتصادی ارائه می‌دهند. از این رو، ارزیابی جامع آبخیزها از ضرورت‌های غیرقابل انکار مدیریت منابع آبخیز است. آگاهی از وضعیت سلامت و پایداری آبخیز از ارکان اساسی آبخیزداری پایدار است. دستیابی به این آگاهی، نیازمند یک رویکرد کاملاً نظام‌مند و جامع‌نگر است. روش‌ها و مدل‌های متنوعی برای ارزیابی سلامت زیست‌بوم‌های گوناگون به‌وسیله پژوهش‌گران محیط زیست و بوم‌شناختی ارائه شده است. آژانس‌های زیست‌محیطی، مدل‌هایی را برای بررسی تغییرات به‌وجود آمده در محیط زیست با رویکرد روابط انسان-محیط زیست گردآوری کرده‌اند که ساده‌ترین آن‌ها مدل فشار-وضعیت-پاسخ است. برای یک آبخیز بر اساس عامل‌های گوناگون باید شاخص‌هایی تعریف و تعیین کرد که به‌وسیله آن بتوان سلامت یا پایداری آبخیز را ارزیابی کرد و یا با استفاده از روش‌ها و روابط ریاضی وضعیت یک آبخیز را درجه‌بندی کرد. هدف این پژوهش این است که یک شاخص چند بعدی در زمینه پایداری آبخیز ارائه شود که بتوان تا حد ممکن ابعاد بیشتری از مؤلفه‌های سلامت و پایداری آبخیز را پوشش داد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: zare.rafat@sku.ac.ir

استناد: زارع بیدکی، ر.، درخشان، ش.، خیبری، س.، چاوز، ه.، ۱۴۰۳. بازآفرینی شاخص پایداری آبخیز بر اساس چارچوب محرک-فشار-وضعیت-اثر-پاسخ در آبخیز بهشت‌آباد. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۸(۱): ۹۶-۱۱۲.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2024.365917.1586

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۲۹
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۳، دوره ۳۸، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۴۶، بهار، ۱۴۰۴، صفحه‌های ۹۶ تا ۱۱۲.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



مواد و روش‌ها

در راستای هدف این پژوهش، شاخص پایداری آبخیز با انتخاب معیارهای معرفی شده در چهار بعد آب‌شناسی (کمی و کیفی)، محیط زیست، زندگی و سیاست (HELP) گردآوری شد. چارچوب محرک-فشار-وضعیت-اثر-پاسخ (DPSIR) یک چارچوب ساختاری انعطاف‌پذیر و حمایت‌گر است که در بسیاری از مراحل تصمیم‌گیری به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند. در این مطالعه، برای انتخاب زیرمعیارهای مناسب‌تر و گویاتر، از میان زیرمعیارهای پرشمار، از بررسی گسترده منابع علمی موجود و بحث و تبادل نظر با کارشناسان و خبرگان استفاده شد. تمام زیرمعیارها در چهار زیرآبخیز از آبخیز بهشت‌آباد در استان چهارمحال و بختیاری ارزیابی شد و نمره‌های بهنجار شده در فاصله صفر تا یک به هر کدام داده شد. اندازه‌نهایی شاخص پایداری آبخیز با در نظر گرفتن وزن مساوی برای هر کدام از معیارها با روش میانگین حسابی به دست آمد.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد وضعیت شاخص پایداری آبخیز در کل آبخیز بهشت‌آباد متوسط (۰/۶۲۵) بود و زیرآبخیزها تفاوت کمی با هم داشتند. شاخص پایداری آبخیز در زیرآبخیز بروجن، فارسان، کیار و شهرکرد به ترتیب ۰/۶۵، ۰/۶۱، ۰/۶۷ و ۰/۶۷ به دست آمد. معیار محیط زیست در چهار زیرآبخیز از آبخیز بهشت‌آباد امتیاز بیشتری کسب کرد. نمره سیاست در هر چهار زیرآبخیز مطالعه شده یکسان بود، چون معیارها در سطح ملی اندازه‌گیری شده بودند. همچنین، معیار زندگی نیز به دلیل بررسی زیرمعیارهایی که در سطوح کلان‌تر از زیرآبخیز اندازه‌گیری شده بودند، امتیازات نزدیک به هم کسب کرد. از میان معیارها، معیار محیط زیست، امتیاز بیشتر و معیار زندگی و آب‌شناسی امتیاز کمتر را کسب کردند. در چارچوب نیروی محرک-فشار-وضعیت-اثر-پاسخ امتیاز معیارهای مرتبط با اثر بیشتر بود و امتیاز معیارهای مرتبط با فشار کمتر بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

شاخص پایداری آبخیز بهشت‌آباد را می‌توان با تمرکز بر زیر معیار آب‌شناسی، افزایش مشارکت مردم در راه‌کارهای بهبود آبخیز، آموزش جوامع در حفظ آب و افزایش نقش آفرینی جوامع محلی در برنامه‌های جنگل‌کاری بهبود بخشید. افزون بر این، معیار محیط زیست را می‌توان با افزایش کاشت گیاهان و با محدود کردن سرعت شهرنشینی در آبخیز بهبود بخشید. به خاطر کم بودن امتیاز معیارهای زندگی و سیاست و زیاد بودن امتیاز محیط زیست می‌توان گفت جبر جغرافیایی حاکم بر منطقه به سود آبخیز بوده و فقط مدیریت و سیاست‌های حاکم بر آبخیز درخور نبوده است. این شاخص ابزار ارزشمندی، برای تصمیم‌گیری مدیران آبخیز است. تنگناها و محدودیت‌ها را می‌توان با استفاده از این شاخص شناسایی کرد. شناسایی این محدودیت‌ها، فرصتی برای بهبود وضعیت کنونی آبخیز است که نیازمند همکاری کارآمد میان نهادهای گوناگون است. شاخص WSI یک شاخص کل‌نگر است و برای اهداف مدیریت زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی ظرفیت زیادی دارد. بر اساس نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود که اگر مدیران و تصمیم‌گیرندگان از این ابزار به شکل منظم (به عنوان مثال هر ۵ سال یک‌بار) استفاده کنند می‌توانند توصیف مناسبی از تغییرات پایداری آبخیز را در اختیار داشته باشند.

واژگان کلیدی: آبخیز بهشت‌آباد، آب‌شناسی، استان چهارمحال و بختیاری، سلامت آبخیز

مقدمه

آبخیزهای سالم خدمات بوم‌نظامی بسیاری در زمینه های گوناگون اجتماعی و رفاه اقتصادی ارائه می‌دهند (آژانس حفاظت از محیط زیست ۲۰۱۲). از این رو، ارزیابی جامع آبخیزها از ضرورت‌های غیرقابل انکار مدیریت منابع آبخیز است. از عامل‌های کلیدی در توسعه و پیشرفت یک برنامه جامع نظارت این است که آبخیز را باید به‌عنوان یک ساختار یکپارچه که خدمات آن تحت تأثیر عامل‌های فیزیکی، آب‌شناختی، بوم‌شناختی، اقتصادی، اجتماعی و سیاسی است، در نظر گرفت. آگاهی از وضعیت سلامت و پایداری آبخیز از ارکان اساسی مدیریت پایدار آبخیز است. دستیابی به این آگاهی، نیازمند یک رویکرد کاملاً ساختاری و جامع‌نگر است. تاکنون برای ارزیابی پایداری آبخیز رویکردها و روش‌های گوناگونی معرفی، توسعه و به‌کارگرفته شده است. اگر چه در کلیت پایداری، در میان نخبگان و سیاست‌گذاران اجماع جهانی وجود دارد و این مفهوم از سوی بسیاری از دولت‌ها و مجامع بین‌المللی پذیرش شده است، اما در مفهوم آن و ساز و کارهای دستیابی به پایداری و در نهایت شاخص‌ها و روش‌های سنجش توسعه پایدار، اجماع همه جانبه‌ای وجود ندارد. شاخص‌های پایداری با دیگر شاخص‌ها متفاوت است، زیرا به یک جهان‌بینی یکپارچه نیاز دارد که لازمه آن ارتباط میان اقتصاد، محیط زیست و جامعه یک جامعه خاص است (سیلوا و همکاران ۲۰۰۹).

شاخص‌های پایداری به منابع اطلاعات مهمی تبدیل می‌شوند که برای نظارت بر فرآیندهای محرک پویایی ساختارهای اجتماعی، اقتصادی، محیطی و نهادی و غیره استفاده می‌شوند (مینارد و همکاران ۲۰۱۷). از جمله این روش‌های جامع‌نگر که برای ارزیابی پایداری آبخیزها معرفی شده‌اند شاخص پایداری آبخیز WSI است که در سال ۲۰۰۷ به‌وسیله چاوز و آلپاز معرفی شد. این شاخص با پیروی از ابتکار جهانی آب‌شناسی برای محیط زیست، حیات و سیاست از چهار معیار آب‌شناسی، محیط زیست، معیشت و سیاست (HELP) تشکیل شده است. در فوریه ۱۹۹۹، پنجمین کنفرانس

مشترک یونسکو و سازمان هواشناسی جهانی در زمینه آب‌شناسی به اتفاق آراء، ابتکار جهانی جدیدی تحت عنوان HELP (آب‌شناسی، محیط زیست، زندگی و سیاست) را تأیید کرد که یک شبکه جهانی از آبخیزها برای بهبود پیوندهای میان آب‌شناسی و نیازهای جامعه ایجاد کند. از آنجایی که آبخیز واحد طبیعی آب‌شناسی است، HELP به‌طور ویژه مبتنی بر آبخیز است (یونسکو ۲۰۰۱). با این حال، HELP مردمی و محیط زیست محور، مشکل محور و پاسخگو به تقاضا است: مسائل محیط زیست، زندگی و سیاست را نقطه شروع و آب‌شناسی را ابزاری برای حل آنها می‌داند (شاتل وورث ۲۰۰۰). ابتکار HELP سیاست‌گزاران، مدیران و جوامع علمی را تشویق می‌کند تا با توسعه این مفهوم با یکدیگر همکاری کنند و علم بتواند از نزدیک با نیازهای سیاست و مدیریت ادغام شود (فالکن مارک ۲۰۰۴).

چارچوب فشار- وضعیت- پاسخ (PSR) به‌وسیله سازمان همکاری و توسعه اقتصادی (۲۰۰۳) استفاده شده است و هر کدام از معیارها، زیرمعیارهایی دارد که در سه سطح تقسیم شده‌اند (چاوز و آلپاز ۲۰۰۷). چارچوب PSR برای استفاده از زنجیره علت و معلولی عامل‌های دخیل در پایداری آبخیز به‌کارگرفته شده است و در حقیقت موجب شکل‌گیری ارتباط میان پژوهش‌گران، ذی‌مدخلان و سیاست‌گزاران می‌شود (وانلی و همکاران ۲۰۱۵). چارچوب فشار- وضعیت- پاسخ به‌وسیله فرند و راپورت (۱۹۷۹) توسعه یافت و در نتیجه اجرای آن به‌وسیله سازمان همکاری و توسعه اقتصادی به‌عنوان یک الگو برای توسعه شاخص‌های زیست‌محیطی در سراسر جهان به‌طور گسترده‌ای استفاده شد. مدل PSR به‌دنبال بررسی علت سه مسئله است:

- ۱- فشار ناشی از فعالیت‌های انسانی در زمینه‌های گوناگون
- ۲- چگونه این فشارها بر وضعیت ساختارهای طبیعی تأثیرگذار است.
- ۳- پاسخ دولت‌ها و جوامع عمومی برای رسیدگی، که با سیاست‌ها و قوانین گوناگون تغییر می‌کند.

پاسخ‌های سیاستی (تقدم و سامان‌دهی اهداف) خواهد شد. چارچوب نیروی محرکه-فشار-وضعیت-اثر-پاسخ^۴ یک چارچوب انعطاف‌پذیر و حمایت‌گر از رویکرد ساختار است که تصمیم‌گیرندگان در بسیاری از مراحل تصمیم‌گیری می‌توانند از آن استفاده کنند. از این رو، این چارچوب ابزاری ارزشمند برای سازمان‌دهی و ایجاد ارتباط با موضوعات پیچیده زیست‌محیطی است. در این راستا می‌توان به پژوهش‌های مصفایی و همکاران (۲۰۲۱، ۲۰۲۲، ۲۰۲۳) در شناخت مشکلات آبخیز و تعیین پاسخ‌های مدیریتی اشاره کرد. این پژوهش بر مبنای خلق شاگله جامع‌نگری در مفهوم پایداری آبخیز، بر اساس مبانی علمی و تخصصی از فرایندهای دخیل در پایداری انجام شد و تلاش شد تا بستر مناسبی برای درک مشابه از مفاهیم پایداری آبخیز با کمترین تفاوت نظر طراحی شود. همچنین، در این پژوهش تلاش شد تا یک شاخص چند بعدی در زمینه پایداری آبخیز ارائه شود که بتوان تا حد امکان ابعاد بیشتری از مؤلفه‌های سلامت و پایداری آبخیز را پوشش داد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

آبخیز بهشت‌آباد با مساحت ۳۸۷۰/۹۳ کیلومتر مربع در میان رشته کوه‌های زاگرس و در شمال شرق استان چهارمحال و بختیاری است و از زیرآبخیزهای آبخیز کارون بزرگ به‌شمار می‌آید. این آبخیز میان عرض‌های جغرافیایی شمالی ۳۱°۸۲' و ۳۲°۵۶' و طول‌های جغرافیایی شرقی ۵۰°۳۷' و ۵۱°۴۲' است. این آبخیز در بخش‌هایی از شش زیرآبخیز آب‌شناخت شهرکرد، بروجن، فارسان، شلمزار، سفیددشت و کیار است. در این آبخیز بیشترین بلندی ۳۶۰۶ متر و کمترین بلندی ۱۶۵۴ متر است. موقعیت آبخیز مطالعه‌شده در شکل ۱ نشان‌داده شده است. جمعیت این آبخیز بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵ شمسی ۵۳۰۵۳۱ نفر بود و بر پایه برآورد سرشماری سال ۱۴۰۰ شمسی ۵۵۸۵۱۷ نفر بود. جمعیت شهری آبخیز در سال ۱۳۹۵ برابر با

با توجه به اینکه معیار آب‌شناسی خود به معیارهای کیفی و کمی تقسیم‌شده است در مجموع ۱۵ زیرمعیار این شاخص را می‌سازد. به هرکدام از معیارها با توجه به رابطه معرفی‌شده امتیازی داده می‌شود. امتیازها به‌همینار می‌شوند که در مقیاس میان صفر تا یک است. سپس با میانگین حسابی امتیازهای زیرمعیارها، امتیاز معیار تعیین می‌شود و امتیازهای معیارها به امتیاز شاخص تبدیل می‌شود. تفسیر نتایج بر اساس اندازه نهایی شاخص انجام می‌شود. کمتر از ۰/۵، به معنی پایداری کم، میان ۰/۵ تا ۰/۸ به معنی متوسط و بیشتر از ۰/۸ به معنی پایداری خوب یا زیاد است (کاسترو و همکاران ۲۰۱۶). شاخص معرفی‌شده بدون وزن است. به بیان دیگر، معیارها و زیرمعیارها اهمیت یکسانی دارند. از زمان معرفی شاخص پایداری آبخیز در سال ۲۰۰۷، پژوهشگران برای ارزیابی پایداری آبخیز در مناطق پرشماری از دنیا از آن استفاده کردند. در این راستا می‌توان به پژوهش‌های کاستانو و همکاران (۲۰۰۹)، کاسترو و همکاران (۲۰۱۶)، چاندنیها و همکاران (۲۰۱۴)، کورتز و همکاران (۲۰۱۲)، فیردوس و همکاران (۲۰۱۴)، مینارد و همکاران (۲۰۱۷)، زارع بیدکی و همکاران (۲۰۲۳) اشاره کرد. چارچوب فشار-وضعیت-پاسخ، گسترش یافت و ابعادی به زنجیره علت و معلولی اضافه شد. چارچوب DPSIR در ابتدا به‌وسیله سازمان همکاری اقتصادی و توسعه ارائه شد و به‌وسیله آژانس حفاظت محیط‌زیست اروپا^۲ در سال ۱۹۹۹ توسعه یافت و به‌وسیله سازمان ملل در سال ۲۰۰۷ استفاده شد و نتایج طرح ابتکاری پورتوریکو به‌وسیله آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا^۳ برای ایجاد ارتباط میان فعالیت‌های انسانی با وضع محیط زیست قابل قبول بود (برادلی و همکاران ۲۰۱۶). بر مبنای چارچوب DPSIR، سلسله‌ای از روابط علی با نیروهای محرک (اعم از بخش‌های اقتصادی، فعالیت‌های انسانی) شروع شد و با اعمال فشار (انتشار آلاینده‌ها، مصرف منابع) بر وضعیت زیست‌محیطی و اثرگذاری بر بوم‌نظام‌ها و سلامت انسان، در نهایت سبب شکل‌گیری

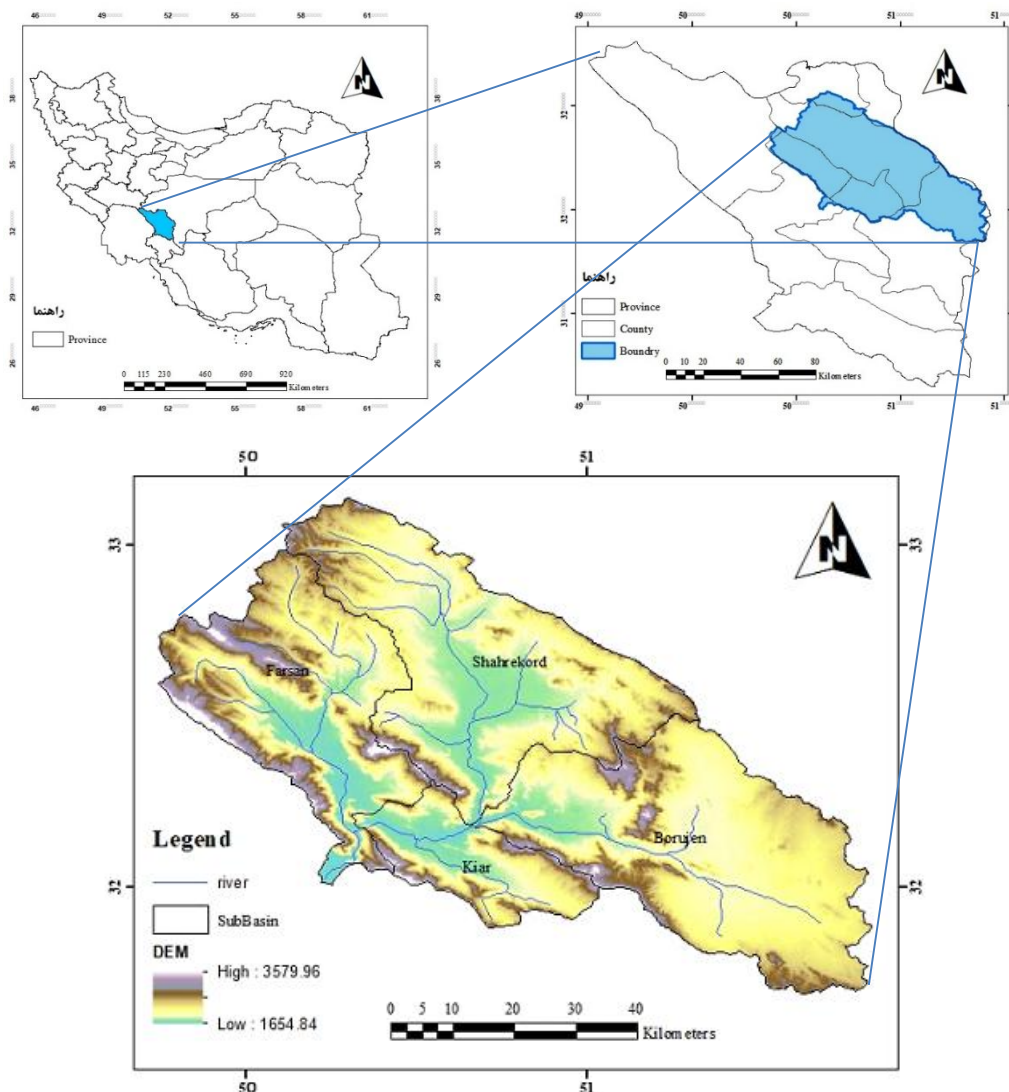
4-Driving Force-Pressure-State-Impact-Response

2-European Environmental Agency

3-US Environmental Protection Agency

روستا به شهر است. باید توجه داشت که ۵۹٪ از جمعیت استان در این آبخیز سکونت دارد. شهرهای شهرکرد، بروجن و فارسان شهرهای پرجمعیت استان هستند و بیشتر صنایع و زیرساخت های استان در آن است.

۴۶۷۱۲۳ نفر و جمعیت روستایی آن ۶۳۴۰۸ نفر بود. جمعیت شهری و روستایی در سال ۱۴۰۰ به ترتیب به ۴۹۶۷۳ و ۵۳۸۱۲۶ نفر رسید. رشد جمعیت شهری ۱۵/۰۳٪ بود و جمعیت روستایی ۲۱/۶۶٪- بود که دلیل آن مهاجرت از روستا به شهر و یا مشمول تعاریف تبدیل



شکل ۱- موقعیت آبخیز بهشت آباد در استان چهارمحال و بختیاری و ایران.

Figure 1- Location of Beheshtabad Watershed in Chaharmahal-va-Bakhtiari Province and Iran.

روش پژوهش

ارائه شده است. در این پژوهش شاخص WSI با استفاده از رابطه زیر (HELP) محاسبه شد.

$$WSI = \frac{H + E + L + P}{4} \quad (1)$$

شاخص پایداری آبخیز (WSI) را چاوز و آلیپاز (۲۰۰۷) معرفی کردند. در این شاخص معیارهای آب شناسی، محیط زیست، زندگی و سیاست در نظر گرفته شده است. شاخص WSI به شکل ویژه برای ارزیابی پایداری آبخیز

معیارها در چهار زیرآبخیز فارسان، کیار، شهرکرد و بروجن که در مجموع آبخیز بهشت‌آباد را تشکیل می‌دهند، با استفاده از روش ساده میانگین حسابی، اندازه‌های امتیاز هر معیار در ابعاد پنج‌گانه معرفی شده، حساب شد.

در گسترش رویکرد PSR به DPSIR دو بعد اثر و نیروی محرکه به ابعاد شاخص اضافه شد (جدول ۱). زیرمعیارهای نیروی محرکه و اثر، با اجماع متخصصان انتخاب شدند و شاخص جدید برای آبخیز بهشت‌آباد محاسبه شد. پس از تعیین اندازه‌های زیرمعیارها و

جدول ۱- معیارهای شاخص پایداری آبخیز با رویکرد چارچوب نیروی محرکه-فشار-وضعیت-اثر-پاسخ

Table 1-Criteria of WSI with approach of DPSIR Framework

WSI (DPSIR)	Driving Force	Pressure	State	Impact	Response
Hydrology (Quantity)	Population Growth Rate in the last 5 years	variation in the basin's per capita water availability in the last 5 years (m3/capita year)	Basin per capita water availability (m3/capita year)	Losing Water related jobs	Improvement in water-use efficiency (Last 5 years)
Hydrology (Quality)	Increase in agricultural activity (increase orchard and farming area)	variation in the basin BOD5 (last 5 years)	Basin BOD5 (yearly average) (mg/l)	water related disease	Improvement in sewage treatment/disposal (Last 5 years)
Environment	Increase in industry activity (increase in industry units in the last 5 years)	Basin's EPI (rural and urban)	Percent of basin area with natural vegetation	Change in plant biodiversity & decrease of natural vegetation area	Evolution in basin conservation (Protected areas, BMPs)
Life	Average of family Income (in M. Rials)	Variation in the basin per capita GDP in the last 5 years	Basin HDI (weighed by county population)	Rural to urban migration	Evolution in the basin HDI (Last 5 years)
Policy	Socioeconomic Participatory Indicator	Variation in the basin HDI-Ed in the last 5 years	Basin institutional capacity in WRM (legal and organizational)	Agricultural water efficiency (WRM projects)	Evolution in the basin's WRM expenditures in the Last 5 years

شد. از گزارش فنی شاخص توسعه انسانی سازمان ملل منتشرشده (۲۰۲۱) برای محاسبه شاخص توسعه انسانی استفاده شد. برای تعیین تفاوت‌های مکانی اندازه شاخص پایداری در آبخیز بهشت‌آباد آبخیز نامبرده به چهار زیرآبخیز تفکیک شد (شکل ۱) و اندازه‌های زیرمعیارها برای هر کدام به‌دست آمد.

تعیین امتیاز یا امتیازهای هر کدام از زیرمعیارهای فشار، وضعیت و پاسخ بر اساس روش چاوز و آلیپاز (۲۰۰۷) انجام شد. امتیاز زیرمعیارهای نیروی محرکه و اثر به ترتیب بر اساس جدول‌های ۲ و ۳ محاسبه شد. اطلاعات لازم برای محاسبه سنج‌ها با استخراج از نقشه‌های موجود، مصاحبه حضوری با ادارات مرتبط و همچنین از آمار درج‌شده در درگاه ملی آمار دریافت

جدول ۲- تشریح سنجه‌ها، تراز و امتیاز نیروی محرکه شاخص پایداری آبخیز بهشت‌آباد

Table 2- Description of WSI driving force parameters, levels and scores

Indicator	Driving force Parameters	Level	Score
Hydrology (Quantity)	Population growth rate in the last 5 years [(Current population – Population of the last 5 years) / Population of the last 5 years] * 100	>120	0.00
		90-120	0.25
		60-90	0.50
		30-60	0.75
		0-30	1.00
Hydrology (Quality)	Increase in agricultural activity (increase orchard and farming area) [(Current area of agriculture and gardens – Area of agriculture and gardens in the last 5 years) / Area of agriculture and gardens in the last 5 years] * 100	$\Delta > 40\%$	0.00
		$20 < \Delta < 40\%$	0.25
		$0 < \Delta < 20\%$	0.50
		$\% -20 < \Delta < 0\%$	0.75
		$\Delta < -20\%$	1.00
Environment	Increase in industry activity (increase in industry units in the last 5 years) [(Number of current industrial units – Number of industrial units in the last 5 years) / Number of industrial units in the last 5 years] * 100	$\Delta > 30$	0.00
		$20 < \Delta < 30$	0.25
		$10 < \Delta < 20$	0.50
		$5 < \Delta < 10$	0.75
		$0 < \Delta < 5$	1.00
Life	Average of family Income (in M. Rials) GDP = Wage + Rent + Income + Profit	GDP < 5000	0.00
		5000 < GDP < 10000	0.25
		10000 < GDP < 20000	0.50
		30000 < GDP < 60000	0.75
		GDP > 60000	1.00
Policy	socio economic status (SES) (Modified Kuppuswamy Scale or Classification) DOI: dx.doi.org/10.12803/SJSECO.4711915	Lower (below5)	0.00
		Upper lower (5-10)	0.25
		Lower middle (11-15)	0.50
		Upper middle (16-25)	0.75
		Upper class (26-29)	1.00

جدول ۳- تشریح سنجه‌ها، تراز و امتیاز اثر شاخص پایداری آبخیز بهشت‌آباد.

Table 3- Description of WSI Impact parameters, levels and scores.

Indicator	Impact Parameters	Level	Score
Hydrology (Quantity)	Losing water related jobs	<10000	0.00
		10000 > w < 7500	0.25
		7500 > w < 5000	0.50
		5000 > w < 2500	0.75
		>2500	1.00
Hydrology (Quality)	water related disease	No ≥ 750	0.00
		500 < No ≤ 750	0.25
		250 < No ≤ 500	0.50
		100 < No < 250	0.75
		<100	1.00
Environment	Change in plant biodiversity & decrease of natural vegetation area	$\Delta > 15\%$	0.00
		$10\% < \Delta < 15\%$	0.25
		$5 < \Delta < 10\%$	0.50
		$0\% < \Delta < 5\%$	0.75
		$\Delta < 0\%$	1.00
Life	Rural to urban migration	$\Delta < 30\%$	0.00
		$20\% < \Delta < 30\%$	0.25
		$20 < \Delta < +10\%$	0.50
		$10\% < \Delta < 5\%$	0.75
		$5 < \Delta < 0\%$	1.00
Policy	Agricultural water efficiency (WRM projects)	Very poor	0.00
		Poor	0.25
		Medium	0.50
		Good	0.75
		Excellent	1.00

نتایج و بحث

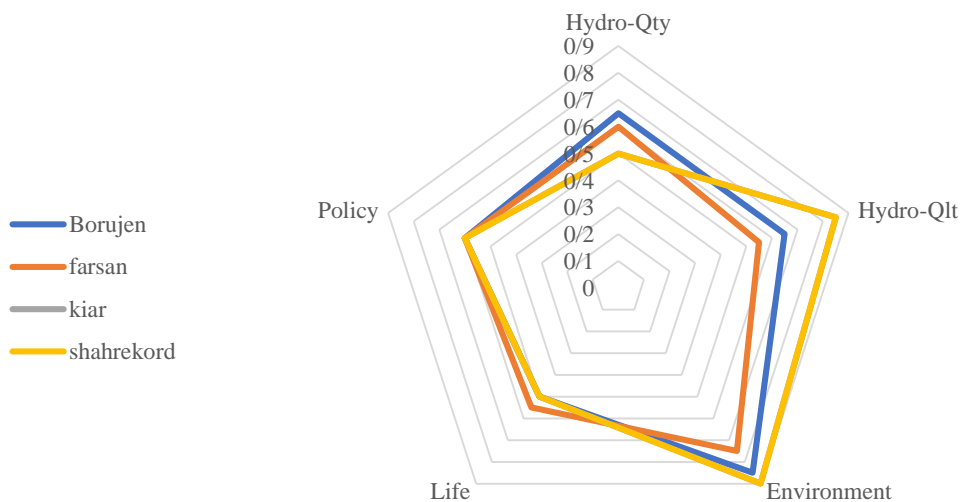
اندازه‌های به‌دست آمده شاخص برای هر چهار زیرآبخیز و کل آبخیز بهشت‌آباد نشان داد، وضعیت پایداری آبخیز نامبرده متوسط بود و هر کدام از زیرآبخیزها از لحاظ پایداری نیز تفاوت بسیار کمی با یکدیگر داشتند. در مقایسه با نتایج به‌دست آمده از پژوهش‌های پیشین در این آبخیز نمی‌توان گفت که اندازه شاخص پایداری تغییر محسوسی کرده است.

نتایج نهایی شاخص پایداری آبخیز با رویکرد چارچوب نیروی محرک-فشار-وضعیت-اثر-پاسخ در جدول ۴ نشان داده شده است. اگرچه هدف نهایی شاخص پایداری آبخیز، فقط به‌دست آوردن اندازه‌های نهایی نبود، اما در گام اول با مقایسه این چهار زیرآبخیز می‌توان گفت که بیشترین پایداری مربوط به زیرآبخیز شهرکرد و کمترین آن مربوط به زیرآبخیز کیار بود.

جدول ۴- نتایج نهایی شاخص پایداری آبخیز با رویکرد چارچوب نیروی محرک-فشار-وضعیت-اثر-پاسخ

Table 4- Results of WSI with approach of DPSIR Framework.

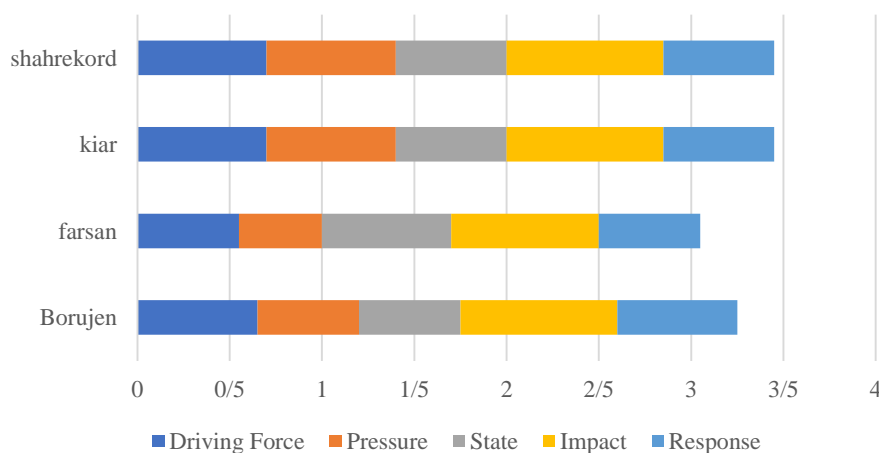
subbasin	Criterion	Driving Force	Pressure	State	Impact	Response	Score	WSI
Farsan	Hydro-Qty	0.5	0.25	0.75	1	0.5	0.6	0.61
	Hydro-Qlt	0.25	0.5	0.75	0.75	0.5	0.55	
	Environment	1	0.25	1	1	0.5	0.75	
	Life	0.5	0.5	0.25	0.75	0.75	0.55	
	Policy	0.5	0.75	0.75	0.5	0.50	0.6	
	Score	0.55	0.45	0.7	0.8	0.55		
Kiar	Hydro-Qty	0.75	0.25	0.25	1	0.5	0.5	0.67
	Hydro-Qlt	1	1	0.5	1	0.75	0.85	
	Environment	0.75	1	1	1	0.75	0.9	
	Life	0.5	0.5	0.25	0.75	0.5	0.5	
	Policy	0.5	0.75	0.75	0.5	0.5	0.6	
	Score	0.7	0.7	0.6	0.85	0.6		
Shahrekord	Hydro-Qty	0.75	0.25	0.25	1	0.5	0.5	0.67
	Hydro-Qlt	1	1	0.5	1	0.75	0.85	
	Environment	0.75	1	1	1	0.75	0.9	
	Life	0.5	0.5	0.25	0.75	0.5	0.5	
	Policy	0.5	0.75	0.75	0.5	0.5	0.6	
	Score	0.7	0.7	0.6	0.85	0.6		
Borujen	Hydro-Qty	1	0.5	0.25	1	0.5	0.65	0.65
	Hydro-Qlt	0.25	0.75	0.5	1	0.75	0.65	
	Environment	1	0.25	1	1	1	0.85	
	Life	0.5	0.5	0.25	0.75	0.5	0.5	
	Policy	0.5	0.75	0.75	0.5	0.5	0.6	
	Score	0.65	0.55	0.55	0.85	0.65		
Total of Watershed		0.65	0.6	0.61	0.84	0.6		0.625



شکل ۳- اندازه‌های معیارهای شاخص پایداری آبخیز برای هر زیر آبخیز.
Figure 3- Values of WSI's Criteria in each Sub-Watershed.

بیشتری در زیر آبخیزها نشان داد. بر اساس انحراف معیار محاسبه شده، به ترتیب آب‌شناسی- کیفیت، آب‌شناسی- کمیت، و محیط زیست بیشترین تغییرات را در کسب امتیازات داشتند. زیر آبخیز کیار کمترین امتیاز معیارهای آب‌شناسی- کمیت و محیط زیست را کسب کرد و کمترین امتیاز معیار آب‌شناسی- کیفیت نیز مربوط به زیر آبخیز فارسان بود. زیر آبخیز شهرکرد از نظر آب‌شناسی- کیفیت و محیط زیست امتیاز بیشتری در مقایسه با زیر آبخیزهای دیگر به دست آورد که دلیل آن وجود امکانات در مرکز استان بود.

با بررسی شاخص پایداری آبخیز، با معیارهای گوناگون می‌توان نقاط ضعف و قوت هر منطقه تشخیص داد. بر اساس شکل ۳ معیار محیط زیست در زیر آبخیزهای چهارگانه آبخیز بهشت‌آباد امتیازهای بیشتری کسب کرد. امتیاز سیاست در هر چهار منطقه یکسان بود، چون معیارها در سطح ملی اندازه‌گیری شده بودند. همچنین، معیار زندگی/معیشت نیز به دلیل بررسی زیرمعیارهایی که در سطوح کلان‌تر از زیر آبخیز اندازه‌گیری شده بودند، امتیازات نزدیک به هم کسب کردند. سه بعد دیگر شاخص پایداری آبخیز تغییرات



شکل ۴- اندازه‌های سنج‌های شاخص پایداری آبخیز برای هر زیر آبخیز.
Figure 4- Values of WSI's Parameters in each Sub-Watershed.

بر پایه شکل ۴، امتیازهای بعد اثر در میان ابعاد پنج‌گانه رویکرد DPSIR بیشترین امتیاز را کسب کردند. اما ضریب تغییرات امتیازهای بعد فشار در میان زیرآبخیزها بیشتر بود. کمترین اندازه فشار در زیرآبخیز فارسان و بیشترین آن در زیرآبخیز شهرکرد به دست آمد.

از مزایای شاخص پایداری آبخیز، انعطاف‌پذیری و تطبیق‌پذیری آن است. همچنین، ابزار مفیدی برای انتقال اطلاعات آبخیز به مخاطبان و تصمیم‌گیران است. شاخص پایداری آبخیز می‌تواند اطلاعات جامعی را برای احیای محیط‌زیست و شاخص‌های انسانی و توسعه صنعتی برای مدیران فراهم آورد. در این پژوهش برای بررسی شاخص پایداری در آبخیز بهشت‌آباد محاسبات لازم در ۴ زیرآبخیز فارسان، کیار، شهرکرد و بروجن که به‌عنوان واحدهای مستقل برای محاسبات در نظر گرفته شده بودند، انجام شد. از این‌رو، اندازه‌های WSI برای هر زیرآبخیز تهیه شد. توسعه شاخص پایداری آبخیز با استفاده از چهارچوب DPSIR امکان تجزیه و تحلیل آبخیز و تفسیر ارتباط بین عوامل گوناگون در آبخیز را بهبود می‌بخشد. بررسی یک دوره زمانی با استفاده از شاخص پایداری آبخیز، مشکلات و محدودیت‌های آبخیز را نشان داد. از این‌رو، تحلیل مشترک معیارها ضروری بود. شاخص پایداری آبخیز بهشت‌آباد ۰/۶۲۵ محاسبه شد و بر پایه جدول ارائه‌شده چاوز و آلیپاز (۲۰۰۷) مشخص شد که وضعیت پایداری آبخیز بهشت‌آباد متوسط است. با توجه به محدوده امتیاز ۰/۵ تا ۰/۷۵ شاخص پایداری آبخیز مطالعه‌شده در محدوده بهینه بود. زیرآبخیز شهرکرد با کسب امتیاز ۰/۶۷ در رتبه یک و زیرآبخیزهای بروجن، فارسان و کیار با کسب ۰/۶۵، ۰/۶۱ و ۰/۵۷ امتیاز به ترتیب رتبه‌های دوم، سوم و چهارم را کسب کردند. با بررسی امتیاز سنج‌ها (جدول ۲) مشخص شد که معیار محیط‌زیست و کیفیت آب‌شناسی به ترتیب نقش اصلی را در افزایش امتیاز پایداری آبخیز بهشت‌آباد و به‌طور ویژه در زیرآبخیز شهرکرد داشتند. معیار کمیت آب‌شناسی در زیرآبخیز کیار با امتیاز ۰/۴ در کاهش پایداری آبخیز اثرگذار بود. امتیاز سیاست در هر چهار زیرآبخیز ۰/۶ بود. این یافته‌ها با نتایج پژوهش محمدی و همکاران

(۲۰۱۷) هم‌راستا است. این معیار نماینده اعتبارات، سیاست‌های زیست‌محیطی و توسعه‌یافته در هر چهار زیرآبخیز بود. با توجه به یکسان بودن امتیاز در آبخیز مرکز استان با دیگر آبخیزها می‌توان گفت که آمار ارائه‌شده از سوی نهادهای دولتی فاقد اعتبار علمی است و یا زیرمعیارهای استفاده‌شده در این پژوهش، قابلیت استفاده در ایران را ندارد. زیرا توزیع اعتبارات، تعداد نیروی انسانی شاغل در بخش آب، محیط زیست، منابع طبیعی و آموزش و ضریب مشارکت در زیرآبخیز مرکز استان، اندازه قابل توجهی در مقایسه با دیگر آبخیزها داشتند.

در زیرآبخیز فارسان، کمترین امتیاز مربوط به آب‌شناسی کیفی و زندگی بود. این یافته با نتایج پژوهش‌های چاندنیها و همکاران (۲۰۱۴)، مهری (۲۰۱۳) و محمدی و همکاران (۲۰۱۷) هم‌راستا است. دلیل کم کیفیت بودن آب در این زیرآبخیز را می‌توان افزایش فعالیت‌های کشاورزی و ورود سموم به آب‌های جاری و استفاده نکردن از روش‌های بهبود تصفیه و هدایت رواناب‌ها دانست.

کشور در سال‌های گذشته با بحران آب روبرو بوده و این آبخیز نیز از این مسئله جدا نبوده است. کاهش بارش سالانه، فرونشست در برخی مناطق آبخیز و انتقال آب میان آبخیزی، اثرات کمبود آب را بیشتر کرده است. این مسائل باعث کاهش امتیاز آب‌شناسی کمی در مقایسه با دیگر معیارها در زیرآبخیز کیار و شهرکرد شد. این یافته با نتایج پژوهش اسماعیل‌زاده (۲۰۱۸) و کورتز و همکاران (۲۰۱۲) هماهنگ است.

در معیار زندگی از شاخص توسعه انسانی (HDI) استفاده شد. این شاخص شامل سه بعد اساسی زندگی (سلامت، آموزش و سطح استاندارد زندگی یا سرانه درآمد) بود. این شاخص بر اساس امید به زندگی، تحصیلات و سرانه درآمد محاسبه شد. در زیرآبخیز بروجن کمترین امتیاز مربوط به معیار زندگی و سنج‌ها وضعیت بود. این یافته با نتایج پژوهش اسماعیل‌زاده (۲۰۱۸) هم‌راستا است.

بر اساس نتایج این پژوهش، در مجموع معیار آب‌شناسی کمی در زیرآبخیز کیار، کمترین امتیاز را کسب کرد.

می‌شود و بیشترین امتیاز را کسب کرد. زیرآبخیز فارسان ۹٪ از مساحت آبخیز را شامل می‌شود و به دلیل داشتن بیشترین اندازه بارندگی و در نتیجه آورد آبی بیشتر رتبه دوم را با امتیاز ۰/۶ کسب کرد. به بیان دیگر نقش اندازه بارش‌های سالانه موثرتر از مساحت آبخیز بود. زیرآبخیز شهرکرد ۳۲٪ از مساحت آبخیز را شامل می‌شود که امتیاز این معیار برای این زیرآبخیز ۰/۵ به دست آمد. زیرآبخیز کیار ۲۵٪ از مساحت آبخیز را شامل می‌شود که امتیاز این معیار برای این زیرآبخیز ۰/۴ محاسبه شد.

امتیاز شاخص پایداری آبخیز بهشت آباد در پژوهش‌های پیشین ۰/۶۹۲ محاسبه شده است و در این پژوهش ۰/۶۲۵ به دست آمد. کاهش امتیاز شاخص پایداری به اندازه ۰/۰۶۷ پس از ۵ سال مطلوب نیست هر چند می‌توان دلیل آن را به کارگیری چارچوب DPSIR به جای چارچوب PSR دانست. دلیل دیگر کاهش امتیاز نهایی پایداری آبخیز را می‌توان نتیجه محاسبه آن به تفکیک زیر آبخیزهای تأییدشده وزارت نیرو (تماب) دانست. همچنین، مقایسه این اعداد با نتایج پژوهش‌های پیشین نشان‌دهنده کاهش نرخ توسعه یافتگی و کاهش نرخ اشتغال است.

در بررسی‌های گذشته معیارهای محیط زیست، سیاست، کیفیت آب‌شناسی، زندگی و کمیت آب‌شناسی به ترتیب رتبه یک تا پنج را کسب کرده‌اند. در این پژوهش محیط زیست همچنان در رتبه اول بود و کیفیت آب‌شناسی از رتبه ۳ به رتبه ۲ و سیاست از رتبه ۲ به رتبه ۳ و زندگی از رتبه ۴ به رتبه ۵ و کمیت آب‌شناسی از رتبه ۵ به رتبه ۴ انتقال یافتند.

با مقایسه نتایج معیارهای نیروی محرکه-فشار-وضعیت-اثر-پاسخ می‌توان گفت که معیار فشار و معیار اثر به ترتیب، کمترین امتیاز (۰/۶) و بیشترین امتیاز (۰/۸۴) را کسب کردند که با نتایج بررسی‌های پیشین آبخیز هماهنگ است.

معیار نیروی محرکه در زیرآبخیز شهرکرد تحت تأثیر آب‌شناسی و محیط زیست بود و به این دلیل امتیاز ۰/۷ را کسب کرد. در زیرآبخیز بروجن این معیار در رتبه دوم

این در حالی است که زیرآبخیز شهرکرد بر اساس معیار محیط‌زیست (سنجه‌های فشار، وضعیت و اثر) بیشترین امتیاز را کسب کرد. این نتایج با یافته‌های نونرزو و همکاران (۲۰۲۳) هماهنگی ندارد. در معیار زندگی از شاخص فشار زیست‌محیطی (EPI) استفاده شد. این شاخص فشار فعالیت‌های کشاورزی انسان بر محیط زیست را ارزیابی می‌کند. محاسبه این شاخص بر اساس تغییرات مناطق کشاورزی و جمعیت است. شاخص محیط زیست در تمام زیرآبخیزها بهترین عملکرد را داشت که بیان‌کننده فشار زیست‌محیطی کم و وجود درصد پوشش گیاهی مناسب در این آبخیز بود. بررسی امتیازات کسب‌شده بر اساس سنجه‌ها نشان داد که بیشترین امتیاز مربوط به سنجه اثر در زیرآبخیز شهرکرد و بروجن و کمترین امتیاز مربوط به سنجه فشار در زیرآبخیز فارسان بود.

معیار زندگی در سه زیرآبخیز کیار، شهرکرد و بروجن ۰/۵ به دست آمد و در زیرآبخیز فارسان ۰/۵۵ محاسبه شد. بیشتر بودن امتیاز معیار زندگی در شهرستان فارسان به‌رغم بعد بزرگتر خانوار در مقایسه با دیگر بخش‌ها، به دلیل درآمد بیشتر سرپرست خانوار، گردش بیشتر پول در زیرآبخیز و رقابت بیشتر در ادامه تحصیل فرزندان خانواده بود. معیار زندگی در چهار زیرآبخیز بعد از معیار سیاست امتیاز کمتری کسب کرد و امتیاز نهایی پایداری آبخیز را کاهش داد.

امتیاز محیط زیست در چهار زیرآبخیز از ۰/۷ تا ۰/۹ متغیر بود و در افزایش امتیاز پایداری آبخیز نقش اصلی را داشت و دلیل آن درصد پوشش گیاهی زیاد آبخیز بهشت‌آباد بود. این معیار کمترین امتیاز را در زیرآبخیز کیار کسب کرد و دلیل آن کسب امتیاز کم در زیرمعیار فشارهای زیست‌محیطی آبخیز و کسب امتیاز کم در زیرمعیار تغییر در سرانه آب در دسترس در ۵ سال گذشته بود. کسب بیشترین امتیاز معیار محیط زیست (۰/۸۳۳) در پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده است. بیشترین کمیت آب‌شناسی مربوط به زیرآبخیز بروجن با امتیاز ۰/۶۵ بود که با توجه به اندازه بارش کمتر در مقایسه با دیگر زیرآبخیزها جای سوال دارد، اما این زیرآبخیز ۳۴٪ از مساحت کل آبخیز بهشت‌آباد را شامل

این حال، آوردن همه این شاخص‌ها در یکجا دشوار است. در این پژوهش، از شاخص پایداری آبخیز (WSI) که آب‌شناسی، محیط‌زیست، زندگی و سیاست را ترکیب می‌کند برای آبخیز بهشت‌آباد در استان چهارمحال و بختیاری استفاده شد. این شاخص ابزار مناسبی، برای تصمیم‌گیری مدیران در آبخیز است. تنگناها و محدودیت‌ها با استفاده از این شاخص قابل‌شناسایی است که در این آبخیز در زمینه آب‌شناسی محدودیت‌هایی شناسایی شد. شناسایی این محدودیت‌ها، فرصتی برای بهبود وضعیت کنونی آبخیز است که نیازمند همکاری کارآمد میان نهادهای گوناگون است. WSI یک شاخص کلی‌نگر است و ظرفیت زیادی برای اهداف مدیریت زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی دارد. بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان گفت که اگر مدیران و تصمیم‌گیرندگان از این ابزار به شکل منظم (به‌عنوان مثال هر ۵ سال یک‌بار) استفاده کنند می‌توانند توصیف مناسبی از تغییرات پایداری آبخیز را در اختیار داشته باشند.

شاخص پایداری آبخیز بهشت‌آباد در بازه زمانی ۱۳۹۹-۱۳۹۰ برابر با ۰/۶۲ به‌دست آمد که نشان‌دهنده سطح پایداری متوسط بود. کمترین اندازه شاخص پایداری مربوط به زیرآبخیز کیار بود در حالی که زیرآبخیز شهرکرد بیشترین شاخص پایداری آبخیز را کسب کرد.

زیرشاخص آب‌شناسی کمی در بیشتر زیرآبخیزها، امتیاز کم‌تری، به‌ویژه در سنجه فشار کسب کرد که بیان‌کننده تنش آبی در آبخیز بود. بر اساس شاخص فالکن مارک زمانی که سرانه آب در دسترس کمتر از ۱۷۰۰ مترمکعب در سال باشد، منطقه دچار تنش آبی است. در زیرآبخیز فارسان با وجود افزایش جزئی جمعیت، بیشترین کاهش سرانه آب در دسترس مشاهده شد.

بر اساس نتایج این پژوهش پایداری آبخیز مطالعه‌شده را می‌توان با بهبود آب‌شناسی آبخیز بهبود بخشید. از این رو، پیشنهاد می‌شود معیار محیط‌زیست را با کاشت گیاهان بیشتر و با محدود کردن سرعت شهرنشینی در آبخیز بهبود بخشید. همچنین پیشنهاد می‌شود از عموم

بود و امتیاز کمتری در مقایسه با زیرآبخیز شهرکرد کسب کرد که دلیل آن کیفیت کمتر آب‌شناسی بود. بیشترین امتیاز معیار فشار مربوط به زیرآبخیز شهرکرد بود، چون متأثر از کیفیت آب‌شناسی، محیط زیست و سیاست بود. به‌بیان دیگر تغییر محسوس در آموزش، شاخص توسعه انسانی و استفاده از ساختارهای تصفیه فاضلاب سبب شد تا BOD5 در زیرآبخیز افزایش یابد. هرچند در این زیرآبخیز کمیت آب‌شناسی ضعیف بود. (۰/۲۵)

معیار وضعیت در زیرآبخیز فارسان در رتبه اول بود که دلیل آن وضعیت موجود زیست محیطی، کیفیت آب‌شناسی (BOD5 در درآمدت) و شاخص توسعه انسانی در این زیرآبخیز بود. معیار وضعیت در زیرآبخیز کیار و بروجن کمترین امتیاز (۰/۵۵) را کسب کرد که دلیل آن کم بودن سرانه آب در دسترس برای هر فرد و کم بودن شاخص توسعه انسانی بود.

سنجه اثر در زیرآبخیز شهرکرد، بروجن و فارسان بیشترین امتیاز را کسب کرد که دلیل آن در زیرآبخیز شهرکرد و بروجن، کسب امتیاز بیشتر در آب‌شناسی (کمی و کیفی) و محیط زیست بود. دلیل این یافته نیز کاهش مشاغل مرتبط با آب در زیرآبخیز و کاهش نرخ بیماری‌های منتقله با آب و جلوگیری از کاهش سطح پوشش گیاهی بود. امتیاز اثر در زیرآبخیز کیار از ۳ زیرآبخیز دیگر کمتر بود و دلیل آن توسعه‌یافتگی کمتر در کاهش مشاغل مرتبط با آب و کاهش سطح پوشش گیاهی بود.

تکامل فعالیت‌های حفاظتی و بهبود روش‌های تصفیه فاضلاب که بر زیرمعیارهای محیط زیست و کیفیت آب‌شناسی اثرگذار است سبب شد زیرآبخیز بروجن رتبه اول در معیار پاسخ را کسب کند. زیرآبخیز کیار کمترین امتیاز پاسخ را در میان زیرآبخیزها کسب کرد و دلیل آن ضعف در بهبود راندمان استفاده از آب، ضعف تصفیه فاضلاب و هدایت هرزآب، فعالیت‌های حفاظتی و توسعه‌نیافتگی مدیریت یکپارچه منابع آب بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

برای دستیابی به پایداری لازم است جنبه‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی آبخیز در نظر گرفته شود. با

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در زمینه نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، بررسی نتایج، ویرایش نسخه نهایی مقاله.

نویسنده دوم: جمع‌آوری داده‌ها و انجام محاسبات لازم، نگارش نسخه اولیه مقاله.

نویسنده سوم: بررسی تحلیل‌های آماری.

نویسنده چهارم: مشاوره در مفهوم‌سازی.

مردم دعوت شود تا در بهبود شرایط آبخیز مشارکت داشته باشند. مردم باید در برنامه‌های جنگل‌کاری دیده شوند و باید برای حفظ آب آموزش داده شوند. همچنین به دلیل کم بودن امتیاز معیارهای زندگی و سیاست و زیاد بودن امتیاز محیط زیست می‌توان گفت جبر جغرافیایی حاکم بر منطقه به سود آبخیز بود و فقط مدیریت و سیاست‌های حاکم بر آبخیز مطلوب نیستند. اگر چه با وجود در نظر گرفتن چهار معیار و پنج سنجه در هر معیار ممکن نیست از تمام منظرها پایداری یک آبخیز سنجیده شود، اما باید در نظر داشت که استفاده از شاخص‌ها و سنجه‌های بیشتر به‌ویژه در آبخیزهایی که آمار و اطلاعات آنها ناقص است و یا با کمبود داده مواجه هستند محاسبه شاخص پایداری آبخیز تحقق نخواهد یافت.

فهرست منابع

- Azarnivand H, Malekian A, Mosaffaei J. 2023. Developing management solutions for Alolak Watershed in the Qazvin Province using the DPSIR approach. *Journal of Watershed Management Research*. 14 (28): 148-162.
- Castro C, Loureiro O, Santos A, Silva J, Rauen W. 2017. Water sustainability assessment for the region of Curitiba. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*. 8(2): 184-194.
- Catano N, Marchand M, Staley S, Wang Y. 2009. Development and validation of the watershed sustainability index (WSI) for the watershed of the Reventazon River. *Environmental Science Geography*. Report:67, 150 p.
- Chandniha S, Kansal M, Anvesh G 2014. Watershed Sustainability Index assessment of a watershed in Chhattisgarh, India. *Curr World Environment*. 9(2):403-411.
- Chaves H, Alipaz S 2007. An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life, and policy: The watershed sustainability index. *Water Resour Manage*. 21(5):883-895.
- Cortes A, Oyarzun R, Kretschmer N, Chaves H, Amezaga J. 2012. Application of the Watershed Sustainability Index to the Elqui river basin. North-Central Chile. *Obras y Proyectos*. 12(2012): 57-69.
- Esmailzade M. 2018. Evaluation of watershed sustainability index using AHP and ANP techniques (Cases study: Beheshtabad Area). Master dissertation. Faculty of Natural Resources and earth sciences. Shahrekord University. 109 p. (In Persian).
- Falkenmark M. 2004. Towards integrated catchment management: opening the paradigm locks between hydrology, ecology and policy-making. *International Journal of Water Resources Development*. 20(3): 275-281.
- Firdaus R, Nakagoshi N, Idris A. 2014. Sustainability assessment of humid tropical watershed: A case of Batang Merao Watershed. Indonesia. *Procedia Environmental Sciences*. 2(2014): 722-731.
- Karimi Sangchini E, Salehpour Jam A, Mosaffaei J. 2022. Flood risk management in Khorramabad Watershed using the DPSIR framework. *Natural Hazards*. 114(3): 3101-3121.
- Maynard I, Cruz M, Gomes L. 2017. Applying a sustainability index to the Japarutuba river watershed in Sergipe state. *Ambiente Sociedade*. 20(2):201-220.
- Mehri R. 2013. Development and application of watershed sustainability index (Case study: ChehelChay Area). Master dissertation. Faculty of Natural Resources. Gorgan University. 128 p. (In Persian).
- Mohamadi T, Dasturani M. 2017. Evaluation of the stability of the Zaydasht Watershed using the watershed stability index. *Journal of Hydrogeomorphology*. 4(10): 41-64. (In Persian).

- Mosaffaie J, Salehpour Jam A, Tabatabaei MR, Kousari MR. 2021a. Developing resources management responses in the gorganroud watershed using the driving force, pressure, state, impact, response (DPSIR) software. *Watershed Management Research Journal*. 34(1): 93-111.
- Mosaffaie J, Salehpour Jam A, Tabatabaei MR, Kousari, MR. 2021b. Trend assessment of the watershed health based on DPSIR framework. *Land Use Policy*. 100(104911)1-9.
- NúñezRazo I, Anda J, Barrios H, Olvera A, García M, Hernández S. 2023. Development of a watershed sustainability index for the Santiago River Basin, Mexico. *Sustainability*. 15(10): 204-236.
- OECD-Environmental Performance and Information Division. 2003. Published estimates database (PEDB) [Online]. Available at <http://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/24993546.pdf>
- Rapport D, Friend A. 1979. Towards a comprehensive framework for environmental statistics: A stress-response approach. *Statistics Canada*, 11-510, Ottawa, Canada.
- Salehpour Jam A, Mosaffaie J, Tabatabaei MR. 2021a. Assessment of comprehensiveness of soil conservation measures using the DPSIR framework. *Environmental Monitoring and Assessment*. 193(1): 1-19.
- Salehpour Jam A, Mosaffaie J, Tabatabaei MR. 2021b. Management responses for Chehel-Chay watershed health improvement using the DPSIR framework. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 23(4):797-814.
- Silva M, Candido G, Martins M. 2009. Método de Construção do Índice de Desenvolvimento Local Sustentável: uma proposta metodológica e aplicada. *Revista Brasileira de Produtos Groindustriais*. 11(1): 55-72.
- Smith A, Yee S, Russell M, Awkerman J, Fisher W. 2016. Linking ecosystem service supply to stakeholder concerns on both land and sea: An example from Guanica Bay watershed, Puerto Rico. *Ecological Indicators*. 74(?):371-383.
- Smith V, Tilman G, Nekola J. 1999. Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*. 1(3): 179-196.
- Soltani MJ, Motamedvaziri B, Noroozi A, Ahmadi H, Mosaffaei J. 2021. Identifying and prioritizing the factors affecting the creation of dust in Hendijan City and providing management solutions by DPSIR framework. *Watershed Engineering and Management*. 13(2): 269-282.
- Soltani MJ, Motamedvaziri B, Mosaffaei J, Noroozi A, Ahmadi H. 2023. Cause and effect analysis of the trend of dust storms using the DPSIR framework in the Hendijan region. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 20(5):4919-4930.
- UNESCO-International Hydrological programme. 2001. The design and implementation strategy of the help initiative, IHV-V, Technical documents in Hydrology. Published estimates data base (PEDB) [Online]. Available at <http://www.unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000124537>
- Vanle T, Duong B, Buurman J. 2015. Development of a watershed sustainability index to assess water resources in the Nhue-Day river basin, Vietnam National Conference. pp. 37-47.



Recreating of Watershed Sustainability Index (WSI) Based on Driving Force-Pressure-State-Impact-Response Framework in the Beheshtabad Watershed

Rafat Zare Bidaki¹, Shahin Drakhshan², Siamak Kheybari³, Henrique Marinho L Chaves⁴

1-Associate Professor of Natural Resources and Earth Sciences Faculty, Shahrekord University, Iran

2- Ph.D. Candidate of Natural Resources and Earth Sciences Faculty, Shahrekord University, Iran

3- Assistant Professor of Sheffield University, United Kingdom

4- Professor of University of Brasília, Brazil

Extended Abstract

Introduction and Goal

Healthy watersheds provide many ecosystem services in various fields such as social and economic welfare. Therefore, the comprehensive assessment of watersheds is one of the undeniable necessities of watershed resource management. Awareness of the health and sustainability of watersheds are fundamental components of sustainable watershed management. Achieving this awareness requires a completely systematic and holistic approach. Various methods and models have been proposed by researchers in the fields of environmental science and ecology to evaluate the health of different ecosystems. Environmental agencies have developed models to examine changes in the environment through the lens of human-environment interactions, with the simplest being the pressure-state-response model. For a watershed, it is essential to define and determine indicators that can assess the health or sustainability of the watershed, or to rank the condition of a watershed using mathematical methods and relationships. This research aims to present a multidimensional indicator concerning watershed sustainability that can encompass as many aspects of health and sustainability as possible.

Material and Methods

To accomplish the objectives of this research, the Watershed Sustainability Index (WSI) has been developed through the selection of criteria categorized into four dimensions: hydrology (both quantity and quality), environment, life, and policy (HELP). The Driving Force-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) framework serves as a versatile and supportive system approach that aids decision-makers across various phases of decision-making. In this study, to identify the most appropriate and representative sub-criteria from a range of options, comprehensive reviews of existing scientific literature and consultations with experts were conducted.

Article Type: Research Article

***Corresponding Author E-mail:** zare.rafat@nres.sku.ac.ir

Citation: Zare Bidaki, R., Drakhshan, Sh., Kheybari, S., Marinho L Chaves, H. 2025. Recreating of Watershed Sustainability Index (WSI) Based on Driving Force-Pressure-State-Impact-Response Framework in Beheshtabad Watershed. *Watershed Management Research*. 38(1): 96-112.

DOI:10.22092/WMRJ.2024.365917.1586

Received: 14 June 2024, **Received in revised form:** 10 October 2024, **Accepted:** 19 December 2024

Published online: 21 March 2025

Watershed Management Research, Vol.38, No.1, Ser. No:146, Spring 2025, pp. 96-112.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



Each sub-criterion was assessed across four sub-basins of the Beheshtabad watershed in Chaharmahal-va-Bakhtiari province, with normalized scores ranging from 0 to 1 assigned to each. The overall score for the watershed sustainability index was derived by applying equal weights to each criterion through the arithmetic mean method.

Results and Discussion

The findings indicate that the overall WSI status of the Beheshtabad Watershed is rated as average (0.625), with minimal variations among the sub-watersheds. The watershed sustainability index for the sub-watersheds of Borujen, Farsan, Kiar and Shahrekord is recorded at 0.65, 0.61, 0.65, and 0.67, respectively. The environmental criterion across the four sub-watersheds of Beheshtabad has achieved superior score. The policy score remains consistent across all four sub-watersheds, as the criteria are evaluated at the national level. Also, the Life criteria have garnered similar scores due to the assessment of sub-criteria measured at the broader levels of the sub-watershed. Among the evaluated criteria, the Environment criterion received the highest score, while the Life and Hydrology criteria recorded the lowest. Within DPSIR parameters, the criteria associated with the Impact received higher scores, whereas those related to Pressure received lower scores.

Conclusion and Suggestions

The watershed sustainability index of the Beheshtabad can be enhanced by focusing on the hydrology sub-criterion, fostering greater community involvement in watershed improvement efforts, educating local populations on water conservation practices, and amplifying the participation of local communities in forestry initiatives. Furthermore, environmental quality can be bolstered through increased planting and curbing the pace of urbanization within the watershed. Given the low scores in the Life and Policy criteria alongside a high rating in the Environment criterion, it can be inferred that the geographical determinism affecting the Beheshtabad watershed has contributed to an elevated Watershed Sustainability Index (WSI), indicating that the existing plans and policies are inadequate. This index serves as a valuable tool for watershed managers in their decision-making processes. It allows for the identification of bottlenecks and constraints. Recognizing these limitations presents an opportunity to enhance the current conditions of the watershed, necessitating effective collaboration among various institutions. The WSI is a comprehensive index with significant potential for managing environmental, social, and economic aspects. Based on the results of this research, it is proposed that regular application of this tool, (such as every five years), can furnish managers and decision-makers with a clear understanding of the watershed's sustainability trajectory.

Keywords: Beheshtabad watershed, Chaharmahal-va-Bakhtiari Province, hydrology, Watershed Health

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:

We have no permission to release data and codes.

Authors' Contribution

Author 1: Conceptualization, control of results, editing of the final version of the manuscript.

Author 2: Data collection and required calculations, writing of the first draft of the manuscript.

Author 3: Control of statistical analyses.

Author 4: Consulting on conceptualization.



مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مرکز تحقیقات، آموزش و توسعه کشاورزی

بررسی عامل‌های مؤثر بر رخدادهای زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن با استفاده از مدل دمپستر - شفر در آبخیز مزلقان چای میانی، استان مرکزی

سهیلا روشن‌ضمیر

مریی گروه جغرافیا دانشگاه پیام نور، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

آبخیز مزلقان چای میانی در غرب شهرستان ساوه است. فعالیت گسل‌ها و وجود سنگ‌های حساس، شرایط مطلوبی را برای رخداد زمین‌لغزش‌های کوچک و بزرگ فراهم آورده است. یکی از راهکارهای مهم برای کاهش زیان‌های ناشی از رخداد زمین‌لغزش‌ها، دوری جستن از مناطق با خطر زیاد و خیلی زیاد است. از این رو، لازم است تا نقشه نسبتاً دقیقی از پهنه‌بندی حساسیت به زمین‌لغزش از بین روش‌های موجود تهیه شود. یکی از بهترین روش‌ها برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش مدل دمپستر- شفر است. هدف از این پژوهش تعیین عامل‌های مؤثر در رخداد زمین‌لغزش و پیشنهاد نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از روش دمپستر-شفر و ارزیابی آن با استفاده از سطح زیر منحنی (AUC) بود.

مواد و روش‌ها

آبخیز مزلقان چای میانی با مساحت ۲۱۷۴۶ هکتار در استان مرکزی است. بیشترین بلندی در این آبخیز ۲۸۳۳ متر از سطح دریا در بلندی‌های شمالی آبخیز و کمترین بلندی در این آبخیز ۱۳۹۹ متر در محل خروجی رود بیوران است. میانگین دمای سالانه منطقه مطالعه شده 13°C است و میانگین بارش سالانه از ۲۴۶ میلی‌متر در جنوب تا ۵۰۰ میلی‌متر در شمال متغیر است. اقلیم منطقه خشک و نیمه‌خشک است. ۵۲٪ از خاک‌های منطقه مطالعه شده در رده خاک‌های انتی‌سول و بدون تکامل پروفیلی است و ۳۷٪ پوشش گیاهی شامل مراتع متوسط و ضعیف است. ابتدا، نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعه شده با استفاده از کارهای میدانی، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شد. سپس، با استفاده از کارهای میدانی و بررسی‌های انجام شده، مهمترین عامل‌های مؤثر بر زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعه شده شامل شیب، جهت، بلندی، فاصله تا گسل، فاصله تا جاده، فاصله از آبراهه، کاربری زمین، سنگ‌شناسی و بارش بررسی و تعیین شدند.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: s_roshanzamir@pnu.ac.ir

استناد: روشن‌ضمیر، س. ۱۴۰۴. بررسی عامل‌های مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن با استفاده از مدل دمپستر- شفر در آبخیز مزلقان چای میانی، استان مرکزی. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۸(۱): ۱۲۷-۱۱۳.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2023.360607.1502

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۴، دوره ۳۸، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۴۶، بهار ۱۴۰۴، صفحه‌های ۱۱۳ تا ۱۲۷.

©نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی و وزن‌دهی در GIS، نقشه پهنه‌بندی حساسیت به زمین‌لغزش با استفاده از روش دمپستر-شفر تهیه و طبقه‌بندی شد. سرانجام، کارایی روش دمپستر-شفر با استفاده از سطح زیر منحنی (AUC) ارزیابی شد.

نتایج و بحث

بیشترین حساسیت به زمین‌لغزش در واحدهای سنگ آهک فسیل‌دار و تناوب خاکستر آتشفشانی سنگ‌شده و گدازه مشاهده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشتر زمین‌لغزش‌ها در فاصله بیش از ۱۰۰ متری از آبراهه‌ها و در فاصله‌های بیش از ۲۰۰ متر از جاده و گسل‌ها رخ داده‌اند. شیب‌های بیشتر از ۴۰٪، نسبت به رخداد زمین‌لغزش بیشترین حساسیت را دارند. بیشترین اندازه زمین‌لغزش در آبخیز مطالعه‌شده مربوط به جهت شیب شمالی، طبقه بلندی بیش از ۲۶۰۰ متر و بارش بیشتر از ۴۵۰ میلی‌متر بود. نتایج پهنه‌بندی با استفاده از مدل دمپستر-شفر نشان داد که ۲۲٪ از منطقه در پهنه‌های حساسیت زیاد و خیلی زیاد بود و ۷۵٪ زمین‌لغزش‌ها در پهنه‌های حساسیت زیاد و خیلی زیاد رخ داده‌اند. اندازه سطح زیر منحنی مربوط به نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش نیز ۰/۸۴۹ به دست آمد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش نقاط زمین‌لغزش با استفاده از دستگاه جی پی اس به‌طور دقیق شناسایی شد. از این‌رو، نقشه پراکنش ۱۹۲ زمین‌لغزش تهیه شد و برای اولین بار در منطقه مطالعه‌شده، بررسی و ثبت شد. از میان واحدهای سنگ‌شناسی، بیشترین حساسیت به زمین‌لغزش مربوط به واحدهای سنگ آهک فسیل‌دار و تناوب خاکستر آتشفشانی سنگ‌شده و گدازه بود و پهنه‌های حساسیت زمین‌لغزش در ارتباط کامل با ساختارهای زمین‌شناسی منطقه بود. پیشنهاد می‌شود که این مدل با دیگر مدل‌ها مقایسه شود و نتایج این پژوهش به‌عنوان اطلاعات پایه‌ای برای مدیریت و برنامه‌ریزی محیطی استفاده شود.

واژگان کلیدی: پهنه‌بندی حساسیت به رخداد زمین‌لغزش، عامل‌های مؤثر به زمین‌لغزش، مدل دمپستر-شفر، مزلقان چای‌میانی

مقدمه

زمین‌لغزش برای این مناطق از میان روش‌های موجود، تهیه شود. در راستای به‌کارگیری مدل دمپستر-شفر و مقایسه آن با مدل‌های دیگر و پهنه‌بندی زمین‌لغزش تاکنون پژوهش‌های پرشماری انجام شده است. شیرانی و همکاران (۲۰۱۸) پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین‌لغزش در آبخیز سرخون زاگرس را با استفاده از دو مدل احتمالاتی دمپستر-شفر و شاخص آنتروپی شانون و ۱۰ عامل مؤثر بر لغزش، انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که عامل کاربری زمین از میان عامل‌های استفاده‌شده، مهمترین عامل بود و کارآمدی مدل شاخص آنتروپی شانون در مقایسه با مدل دمپستر-شفر در پهنه‌بندی حساسیت نسبت به لغزش بیشتر بود. یوسف و همکاران (۲۰۱۶)، برای تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش از مدل‌های نسبت فراوانی، وزن شاهد، شاخص آنتروپی و دمپستر-شفر استفاده کردند. نرخ پیش‌بینی به‌ترتیب

زمین‌لغزش به‌عنوان یک فرایند فرسایشی با پایین افتادن و یا حرکت یکپارچه و اغلب سریع حجمی از مواد رسوبی در امتداد دامنه‌ها مشخص می‌شود که سرعت عملکرد و گستردگی آنها گاهی پدیده‌های فاجعه‌بار به‌وجود می‌آورد (محمودی ۲۰۰۷). پهنه‌بندی خطر شامل تقسیم‌بندی سطح زمین به مناطق مجزا و رتبه‌بندی کردن این مناطق بر اساس درجه واقعی و بالقوه خطر ناشی از بروز زمین‌لغزش بر روی شیب دامنه‌ها است (شریعت‌جعفری ۱۹۹۶) و این نمونه‌ای از اقدام‌های پایه در زمینه ارزیابی خطرات و زیان‌های ناشی از سوانح طبیعی است که می‌تواند مبنایی برای شناخت اندازه خطر زمین‌لغزش به منظور برنامه‌ریزی‌های بلندمدت عمرانی باشد. یکی از راهکارهای مهم برای کاهش زیان‌های ناشی از رخداد زمین‌لغزش‌ها، دوری جستن از این مناطق است. از این‌رو، لازم است تا نقشه نسبتاً دقیقی از پهنه‌بندی حساسیت

۲۹٪/۳۳ از مساحت (۵۴۸۶۴۹) در رده کم و ۲۳٪/۹۶ از مساحت (۴۴۸۲۴۷) در رده خیلی کم بود. مدل با استفاده از یک سوم نقاط لغزشی، نسبت فراوانی^۳ (FR)، شاخص سطح سلول هسته^۴ (SCAI) و منحنی ROC، ارزیابی و اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد، نسبت فراوانی پیکسل‌ها (FR) و شاخص سطح سلول هسته (SCAI) نشان‌دهنده صحت مناسب طبقه‌بندی در پنج طبقه حساسیت بود. همچنین، دقت منحنی مشخصه عملکرد نسبی (ROC) مدل دمپستر شفر با سطح زیر منحنی (AUC) ۷۳٪، نشان‌دهنده ارزیابی خوب مدل و همبستگی زیاد میان نقشه حساسیت تهیه‌شده و نقشه پراکنش زمین لغزش بود. در این راستا، هدف این پژوهش بررسی عامل‌های مؤثر بر رخداد زمین لغزش و تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین به آن با استفاده از روش دمپستر-شفر در مزلقان چای میانی بود.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعه‌شده

آبخیز مزلقان چای میانی با مساحت ۲۱۷۴۶ هکتار در استان مرکزی شامل آبخیزهای بیوران و اردمین و سه آبخیز کوچک در حد فاصل طول‌های ۷۵' ۴۹° تا ۹۱' ۴۹° شرقی و در عرض‌های ۰۶' ۳۵° تا ۲۷' ۳۵° شمالی است. مزلقان چای میانی در غرب شهرستان ساوه در استان مرکزی است (شکل ۱). بیشترین بلندی در این آبخیز ۲۸۳۳ متر از سطح دریا در کوه تخت در بلندی‌های شمالی آبخیز و کمترین بلندی در این آبخیز ۱۳۹۹ متر در محل خروجی رود بیوران است. رودهای بیوران و اردمین از بلندی‌های شمالی آبخیز سرچشمه می‌گیرند و پس از مسافتی در جهت جنوب به رود مزلقان می‌پیوندند. بخش کوهستانی مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونی ژوراسیک، سنگ‌های آتشفشانی ائوسن و طبقات آهک‌رس الیگوسن را در برمی‌گیرد و زمین‌های کم شیب‌تر و تپه‌ماهوری شامل جوش سنگ پلیوسن و نهشته‌های دوران چهارم می‌باشد. میانگین دمای سالانه منطقه مطالعه‌شده ۱۳ °C است و میانگین بارش سالانه

۱۹۵، ۹۵۲، ۹۴۶، و ۹۳۴. به‌دست آمد. چن و همکاران (۲۰۱۶) روش‌های دمپستر شيفر، وایازی لجستیک و شبکه عصبی مصنوعی برای پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در استان شانکسی چین را با یکدیگر مقایسه کردند و دریافتند که بیشترین دقت (۷۳٪/۱۹) مربوط به مدل شبکه عصبی مصنوعی بود. پورقاسمی و همکاران (۲۰۱۳) حساسیت‌پذیری زمین لغزش در آبخیز هراز را با استفاده از دو مدل دمپستر شفر و وزن شاهد و بهره‌گیری از ۱۱ عامل مؤثر بر رخداد زمین لغزش، ارزیابی کردند. اندازه منحنی مشخصه عملکرد نسبی^۱ (ROC) برای دمپستر- شفر و وزن شاهد به ترتیب ۷۲٪/۸۷ و ۷۹٪/۸۷ به‌دست آمد که نشان‌دهنده دقت بیشتر وزن شاهد در مقایسه با روش دمپستر- شفر بود. در پژوهشی، وانگ و همکاران (۲۰۱۶) نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش به‌دست آمده از دو مدل دمپستر- شفر و وزن شاهد را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج ارزیابی سطح زیر منحنی^۲ (AUC) نشان داد که صحت پیش‌بینی نقشه حساسیت‌پذیری براساس مدل شفر ۸۰٪/۰۹ و برای وزن شاهد ۷۹٪/۷۹ بود. بر این اساس اندازه دقت برای هر دو مدل به ترتیب ۸۰٪/۱۹ و ۸۰٪/۷۵ به‌دست آمد. حسین‌پور میلاداران و همکاران (۲۰۱۶) نبودن اطمینان در پیش‌بینی رخداد زمین لغزش را با استفاده از نظریه دمپستر- شفر بررسی کردند و دریافتند که ۶۵٪ زمین لغزش‌ها در طبقه حساسیت خیلی زیاد رخداد داده‌اند. همچنین اندازه سطح زیر منحنی ۰/۷۴ به‌دست آمد. در آبخیز ونک استان اصفهان، عرب‌عامری و شیرانی (۲۰۱۶)، پژوهشی بر اساس تلفیق نقشه زمین لغزش با نقشه‌های عامل‌های مؤثر مانند اندازه شیب، فاصله از جاده، تراکم آبراهه، بلندی، بارش، کاربری زمین، فاصله از گسل، جهت شیب و سنگ‌شناسی انجام دادند و احتمال رخداد زمین لغزش‌ها را از حساسیت خیلی زیاد تا حساسیت خیلی کم طبقه‌بندی کردند. از کل مساحت منطقه، (۱۸۷۰۵۱۶) ۱۲٪/۶۸ از مساحت (۲۳۷۲۵۹) در رده خیلی زیاد، ۱۲٪/۷۸ از مساحت (۲۳۹۰۴۵) در رده زیاد، ۲۱٪/۲۴ از مساحت (۳۹۷۳۱۶) در رده متوسط،

3- Frequency Ratio

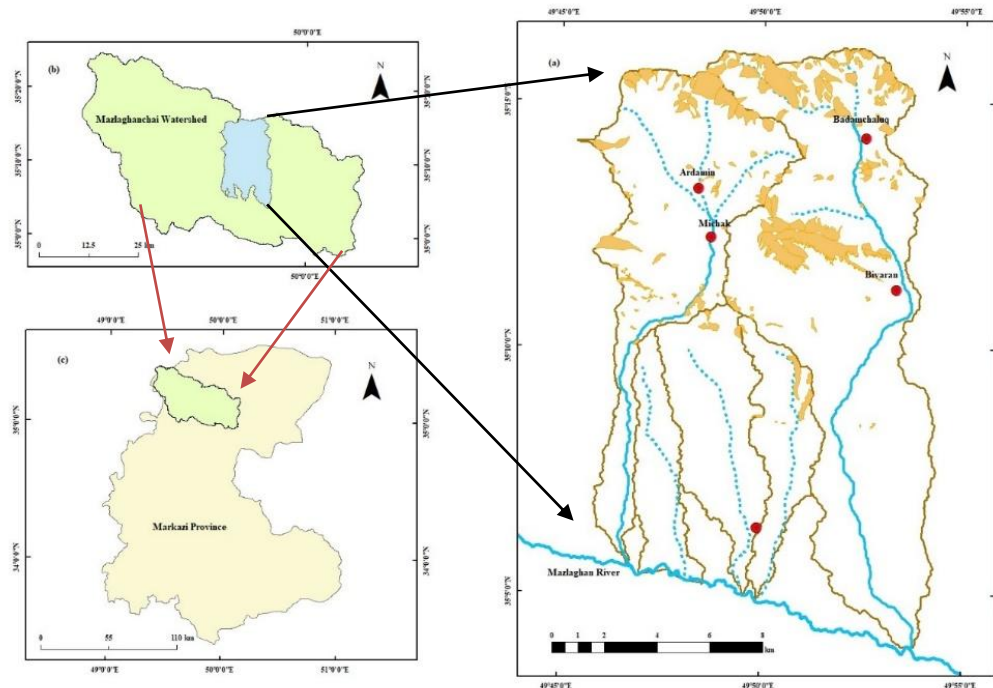
4- Seed Cell Area Index

1- Receiver Operating Characteristic Curve

2- Area Under Curve

با میان لایه‌های آهک‌رس در بلندی بیش از ۲۰۰۰ متر در یک پستی و بلندی ناهموار، شرایط مطلوبی را برای وقوع زمین‌لغزش‌های کوچک و بزرگ فراهم کرده‌است. (روشن ضمیر ۲۰۰۸). بطوریکه رخداد پدیده زمین‌لغزش موجب تخریب دامنه‌ها و انتقال رسوبات به کف دره‌ها و آبراهه‌ها (شکل ۲) و جابه‌جایی جاده‌ها و تخریب باغ‌ها و زمین‌های کشاورزی شده است (شکل ۳).

از ۲۴۶ میلی‌متر در جنوب تا ۵۰۰ میلی‌متر در شمال متغیر است. اقلیم منطقه خشک و نیمه‌خشک است. ۵۲٪ از خاک‌های منطقه مطالعه‌شده در رده خاک‌های انتی‌سول و بدون تکامل پروفیلی است و ۳۷٪ پوشش گیاهی شامل مراتع متوسط و ضعیف است (روشن ضمیر ۲۰۰۸). قرار گرفتن این آبخیز در منطقه سنندج_سیرجان و فعالیت گسل‌های راندگی و راستگرد و وجود پلمه سنگ، ماسه سنگ، جوش سنگ و توده‌های آهکی



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مطالعه‌شده و پراکنش زمین‌لغزش.

Figure 1- Geographical location of the studied area and spatial distribution of landslides.

روش پژوهش

استفاده از منابع اطلاعاتی مانند تفسیر عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای گوگل ارث و نقشه‌های پستی و بلندی، مناطق مستعد رخداد زمین‌لغزش شناسایی شد. سپس بوسیله بازدیدهای میدانی و ثبت موقعیت آنها به وسیله دستگاه GPS، نقشه رقومی پراکنش زمین‌لغزش‌ها شامل ۱۹۲ پهنه لغزشی در گستردگی ۱۶۸۰ هکتار در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شد (شکل ۳). در نواحی سنگلاخی شمال منطقه، بیشتر ریزش و جریان واریزه‌ای و در بخش‌های با بلندی کمتر با پوشش خاک، عمدتاً

معیارها و لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در این پژوهش عبارت از سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، شیب، جهت شیب، بلندی، کاربری زمین، فاصله از جاده، بارش و فاصله از آبراهه بود که در محیط نرم افزار Arc GIS 10.8 تهیه شدند. سپس با استفاده از روابط حاکم بر مدل مپستر-سفر مهم‌ترین عامل‌های مؤثر بر زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن بررسی شد. ابتدا، نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها از طریق بررسی‌های کتابخانه‌ای و بازدیدهای میدانی تهیه شد. در بررسی‌های کتابخانه‌ای با

۱۷۰۰، ۲۰۰۰-۲۳۰۰، ۲۳۰۰-۲۶۰۰ و بیشتر از ۲۶۰۰ متر طبقه‌بندی شد. کاربری زمین یکی از شاخص‌های اصلی در بررسی پایداری دامنه‌ها و پهنه‌بندی حساسیت آن‌ها در یک ناحیه است. لایه اطلاعاتی کاربری زمین با استفاده از نقشه‌های پستی‌بلندی، گوگل‌ارث و بررسی‌های میدانی در هفت طبقه شامل کشاورزی دیمی، کشاورزی آبی، مرتع خوب، مرتع متوسط، مرتع ضعیف، منطقه مسکونی و بستر رود تهیه شد.

فاصله از جاده یکی از عامل‌های مهم برای زمین‌لغزش‌ها و نقشی موازی با عامل فاصله از رود دارد (یالسن ۲۰۱۱؛ عظیم‌پور مقدم ۲۰۱۵). برای رسم جاده‌ها از تصویر گوگل‌ارث استفاده شد و نقشه فاصله از جاده در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی در چهار طبقه ۰-۵۰، ۵۰-۱۰۰، ۱۰۰-۲۰۰ و بیشتر از ۲۰۰ متر تهیه و طبقه‌بندی شد. نقشه بارش با استفاده از معادله وایزی خطی رابطه میان بلندی و اندازه میانگین سالانه بارندگی تهیه شد. این رابطه در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی در نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) اعمال شد و میانگین سالانه بارش در پنج طبقه >300 ، ۳۵۰-۴۰۰، ۴۰۰-۴۵۰ و ۴۵۰-۵۰۰ میلی‌متر تهیه شد. برای تهیه نقشه فاصله از آبراهه، شبکه آبراهه‌های منطقه مطالعه شده با استفاده از ابزار Hydrology در محیط نرم افزار Arc GIS 10.8 استخراج شد و در چهار طبقه ۰-۲۰، ۲۰-۵۰، ۵۰-۱۰۰ و بیشتر از ۱۰۰ متر طبقه‌بندی شد (شکل ۴). سرانجام سطح زیر منحنی مربوط به نقشه حساسیت به زمین‌لغزش ارائه شد. باید گفت طبقه‌بندی متغیرها با توجه به روند تغییرات منحنی نمودار ستونی و طبقه‌بندی‌های موجود است.

لغزش‌های انتقالی کنار رودخانه و گاهی هم لغزش‌های چرخشی مشاهده شد. نقشه سنگ‌شناسی آبخیز مورد مطالعه با استفاده از برگه زمین‌شناسی نوبران با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ رقومی شد. عامل گسل که یکی از عامل‌های مهم در تعیین ناپایداری شیب‌ها و پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش است (شیرانی و همکاران ۲۰۰۶؛ مقیمی و همکاران ۲۰۰۹) با استفاده از نقشه فوق رقومی و در چهار کلاس ۰-۱۰۰، ۱۰۰-۲۰۰، ۲۰۰-۵۰۰ و بیشتر از ۵۰۰ متر در محیط GIS طبقه‌بندی شد. شیب یکی از مهمترین و تأثیرگذارترین عامل‌ها در ارزیابی ثبات شیب است و نقش مهمی در نقشه حساسیت به لغزش دارد (کروستا و کلاگ ۲۰۰۹؛ زو و همکاران ۲۰۱۲). نقشه شیب بر اساس مدل رقومی ارتفاع (DEM) سازمان نقشه‌برداری با دقت ۱۰ متر در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی در پنج طبقه ۰-۵، ۵-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و بیشتر از ۴۰٪ تهیه و طبقه‌بندی شد. جهت شیب نشان‌دهنده تأثیر متفاوت نور خورشید، بادهای گرم و خشک و بارش در جهت‌های گوناگون است (کوماک ۲۰۰۶). نقشه جهت شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی در نه جهت شمال، شمال‌شرق، شرق، جنوب‌شرق، جنوب، جنوب‌غرب، غرب، شمال‌غرب و هموار تهیه شد. تغییرات بلندی هر منطقه، به‌عنوان عامل مؤثر در ایجاد زمین‌لغزش به‌شمار می‌آید (یلسیلناکار ۲۰۰۵). این عامل جهت رواناب‌ها و اندازه تراکم زهکشی را مهار می‌کند (عرب‌عامری و همکاران ۲۰۱۷). نقشه طبقات بلندی با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شد و به شش طبقه >1700 ، ۲۰۰۰-



شکل ۲- زمین‌لغزش‌های قدیمی در رسوبات جوش سنگ.

Figure 2- Old landslides in conglomerate deposits.



شکل ۳- زمین‌لغزش‌های فعال در رسوبات دوران چهارم در بادام‌چالوق.
Figure 3- Active landslides in Quaternary sediments in Badamchaluq.

نظریه دمپستر - شفر

دمپستر این نظریه را در سال ۱۹۶۷ به کار برد. و شفر ساختار ریاضی این نظریه را در سال ۱۹۷۶ تشریح کرد. این نظریه تعمیمی از نظریه بیزین که مبتنی بر احتمالات است می‌باشد (مرادی و همکاران ۲۰۱۰). از آن جا که نظریه بیزین برای هر سوال نیازمند احتمالات است بنابراین این توابع اعتقادی بیانگر درجات اعتقاد برای یک سوال و یا یک احتمال مربوط به آن است (صابرچناری و همکاران ۲۰۱۷).

اگر فرض شود چندین لایه پرشمار از داده‌های مکانی موجود در منطقه حساس به زمین‌لغزش باشد، هر لایه‌ای از داده‌های مکانی به صورت $E_i (i=1,2,\dots,1)$ برای تابع هدف T_p در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب E_{ij} بدست می‌آید که در این رابطه i ویژگی طبقه‌ای از E_i و دارای توزیع فراوانی از موقعیت‌ها یا ویژگی‌های مثبت و منفی در بروز زمین‌لغزش‌هاست. وزن مثبت با علامت $\lambda(T_p)E_{ij}$ نشان داده می‌شود که به صورت روابط زیر تعریف می‌شود (پارک ۲۰۱۰؛ صابرچناری و همکاران ۲۰۱۷)

$$\lambda(T_p)E_{ij} = \frac{\frac{N(L \cap E_{ij})}{N(L)}}{\frac{N(E_{ij}) - N(L \cap E_{ij})}{N(A) - N(L)}} \quad (1)$$

$$\lambda(\bar{T}_p)E_{ij} = \frac{\frac{N(L) - N(L \cap E_{ij})}{N(L)}}{\frac{N(A) - N(L) - N(E_{ij}) + N(L \cap E_{ij})}{N(A) - N(L)}} \quad (2)$$

$$m(T_p)E_{ij} = \frac{\lambda(T_p)E_{ij}}{\sum \lambda(T_p)E_{ij}} \quad (3)$$

$$m(\bar{T}_p)E_{ij} = \frac{\lambda(\bar{T}_p)E_{ij}}{\sum \lambda(\bar{T}_p)E_{ij}} \quad (4)$$

$$m(\theta) = 1 - m(T_p)E_{ij} - m(\bar{T}_p)E_{ij} \quad (5)$$

$N(A)$: تعداد کل پیکسل‌های آبخیز، $N(L)$: تعداد کل پیکسل‌های لغزشی آبخیز، $N(E_{ij})$: تعداد پیکسل‌ها در هر طبقه، $N(L \cap E_{ij})$: اعداد پیکسل‌های لغزشی در هر طبقه، T_p : وضعیت هدف که در این جا مربوط به ویژگی‌های مؤثر در ایجاد زمین‌لغزش است، (\bar{T}_p) : مربوط به عامل‌هایی که روی زمین‌لغزش تأثیری ندارند، $\lambda(T_p)E_{ij}$: نسبت احتمال گزاره هدف مثبت، $\lambda(\bar{T}_p)E_{ij}$: نسبت احتمال گزاره هدف منفی یا قرینه، $m(T_p)E_{ij}$: تابع باور، $m(\bar{T}_p)E_{ij}$: تابع ناباوری، $1 - m(\bar{T}_p)E_{ij}$: تابع مقبولیت است.

بر پایه روابط نامبرده تمام طبقه‌های هر عامل وزن‌دهی و نقشه‌های وزنی عامل‌ها تهیه شد و آبخیز بررسی شده به پهنه‌های گوناگون حساسیت تقسیم شد (شکل ۵).

اعتبارسنجی نقشه پهنه‌بندی زمین لغزش

به منظور اعتبارسنجی نقشه زمین‌لغزش از معیار ارزیابی روش سطح زیر منحنی (AUC) استفاده شد. سطح زیر منحنی عددی است که یک جنبه از کارایی را سنجش

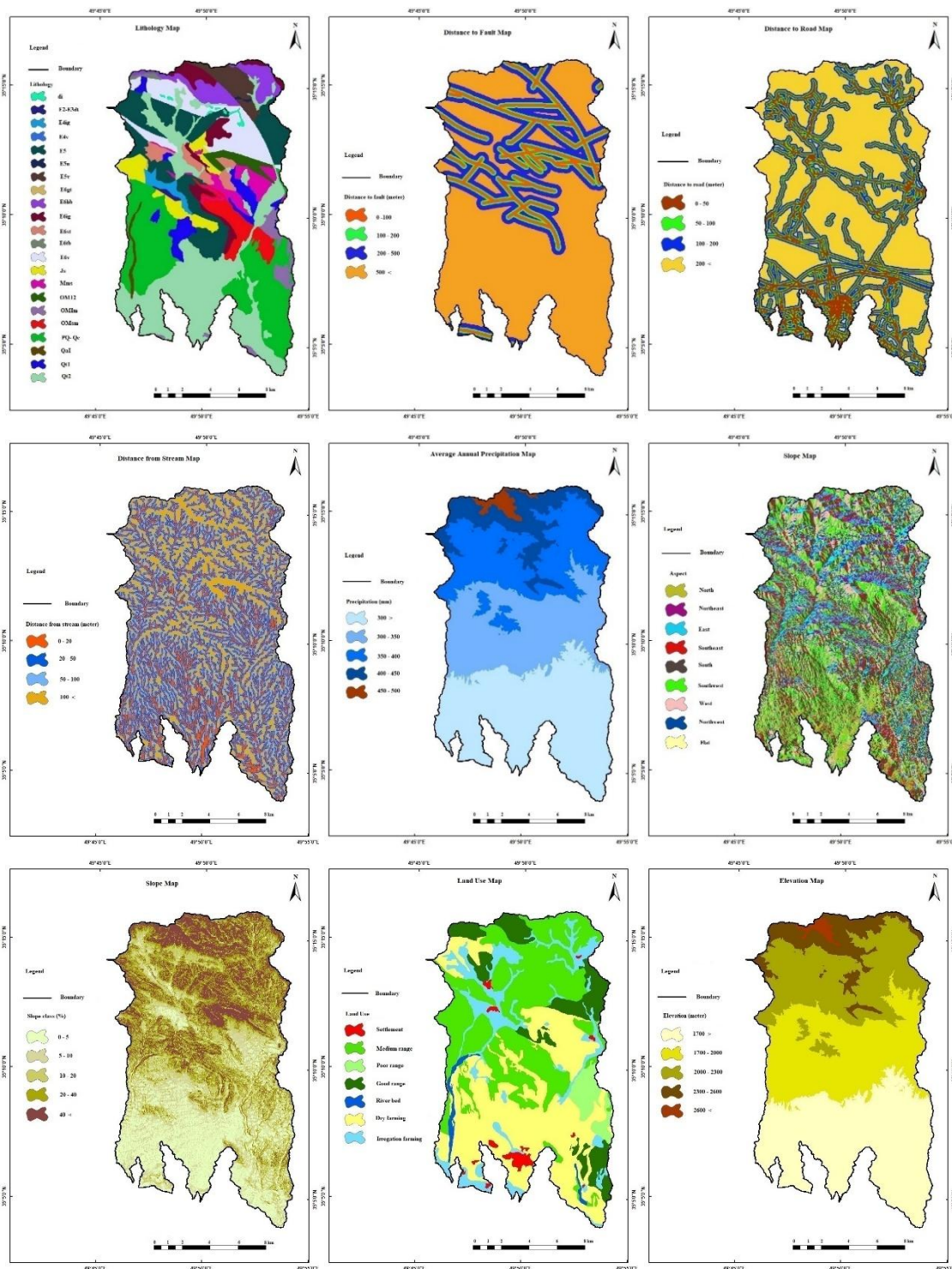
می‌کند و اندازه آن میان صفر و یک است (شکل ۶). اندازه ۰/۵ برابر پیش‌بینی تصادفی است و مقدار ۱ برابر پیش‌بینی عالی است. مطابق با طبقه‌بندی یسیلناکار (۲۰۰۵) عملکرد مدل‌ها براساس درصد سطح زیر منحنی به شرح زیر می‌باشد: صحت ضعیف (۵۰-۶۰٪)، صحت متوسط (۶۰-۷۰٪)، صحت خوب (۷۰-۸۰٪)، صحت خیلی خوب (۸۰-۹۰٪) و صحت عالی (۹۰-۱۰۰٪).

نتایج و بحث

از میان واحدهای سنگ شناسی، بیشترین حساسیت به زمین‌لغزش مربوط به واحدهای سنگ آهک فسیل‌دار (OM12) و تناوب خاکستر آتشفشانی سنگ‌شده و گدازه با ترکیب اسیدی تا حد واسط (E6tb) بود. این یافته با نتایج پژوهش تقوی‌مقدم و همکاران (۲۰۱۳) در آبخیز میرآباد در کوه بینالود که پهنه‌های حساسیت زمین‌لغزش در منطقه را در ارتباط کامل با ساختارهای زمین‌شناسی منطقه می‌دانستند، هم‌راستا است.

بررسی عامل خطی فاصله از آبراهه نشان داد که بیشتر زمین‌لغزش‌ها در فاصله بیشتر از ۱۰۰ متر از آبراهه‌ها اتفاق رخ داده‌اند که این یافته با نتایج پژوهش‌های با

نظرات پور قاسمی و همکاران (۲۰۱۳)، دوکوتا و همکاران (۲۰۱۳)، ثروتی و همکاران (۲۰۰۸) مطابقت دارد. بررسی عامل فاصله از جاده نیز نشان داد که بیشترین درصد زمین‌لغزش‌ها در فاصله بیشتر از ۲۰۰ متر از جاده رخ داده‌اند که با نتایج مطالعات پورقاسمی (۲۰۰۷) مطابقت دارد. بررسی عامل فاصله از گسل نشان می‌دهد که بیشترین درصد زمین‌لغزش‌ها تا فاصله ۲۰۰ متر از گسل‌ها رخ داده‌اند. این یافته با نتایج پژوهش‌های خالدی و همکاران (۲۰۱۲) که متغیر فاصله از گسل را مهمترین عامل مؤثر در پدیده زمین‌لغزش در آبخیز طالقان معرفی کردند، مطابقت دارد. ظرفیت رخداد زمین‌لغزش‌ها ارتباط مستقیمی با مناطق پر شیب آبخیز دارد به طوری که بیشتر زمین‌لغزش‌ها در شیب‌های بیشتر از ۴۰٪، اتفاق رخ داده‌اند که با نتایج پژوهش روستایی و جانانه (۲۰۲۰) در آبخیز بالقلوچای اردبیل که مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده و مؤثر در رخداد زمین‌لغزش را عامل شیب معرفی نمودند، مطابقت دارد. بیشترین حساسیت به زمین‌لغزش در آبخیز مطالعه‌شده نیز مربوط به طبقه جهت شیب شمالی، بلندی بیشتر از ۲۶۰۰ متر و بارش بیشتر از ۴۵۰ میلی‌متر بود (جدول ۱).



شکل ۴ - نقشه عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعه‌شده
 Figure 4- Affective factors maps on landslides in the studied area

جدول ۱- نتایج تلفیق نقاط لغزشی با نقشه عامل های موثر در زمین لغزش.

Table 1- Obtained results from combining landslide points with affective factors map on landslide.

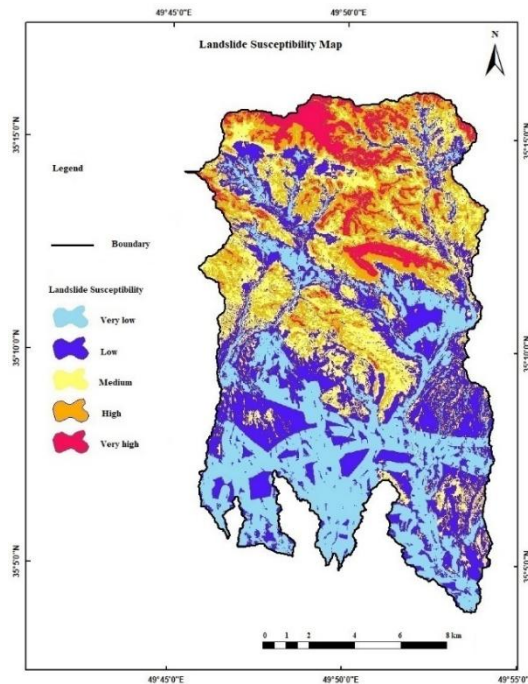
Factor	Class	Total Pixcels	Landslide Pixcels	Mtp(Believe function)	MTp(Unbelieve function)	Mteta(Uncertainty)
Lithology	OMIm	47765	0	0.000	0.046	0.954
	Pl-Q	422959	2547	0.001	0.056	0.942
	OMsm	86403	664	0.002	0.047	0.951
	Qt1	770099	210	0.002	0.047	.0952
	Qal	13573	0	0.000	0.045	0.955
	Qt2	530160	2726	0.001	0.060	0.939
	Js	82053	13921	0.043	0.043	0.914
	Mms	67727	5484	0.019	0.045	0.936
	E2-E3dt	6456	1121	0.55	0.045	0.900
	E6ig	89909	23420	0.075	0.040	.0855
	E5	291726	18243	0.014	0.047	0.939
	E6st	50635	6338	0.030	0.044	0.925
	E4ig	24816	1155	0.010	0.045	0.944
	E6gt	1066	4	0.001	0.045	0.954
	E6v	169100	14846	0.020	0.045	0.935
	OMI2	36926	23512	0.373	0.039	0.588
	di	8163	650	0.017	0.045	0.938
	E5v	66960	20860	0.096	0.040	0.863
	E5n	2043	0	0.000	0.045	0.955
	E4v	378	46	0.029	0.045	0.925
E6hb	93340	28345	0.093	0.039	0.868	
E6tb	6350	2271	0.118	0.045	0.837	
Distance to road(meter)	0 - 50	431347	13226	0.128	0.306	0.567
	50 - 100	269668	9696	0.151	0.284	0.565
	100 -200	372749	17697	0.201	0.285	0.513
	> 200	1100852	125699	0.520	0.125	0.355
Distance to fault(meter)	0 - 100	199885	29976	0.339	0.210	0.459
	100 - 200	172880	26432	0.347	0.204	0.449
	200 -500	396323	39361	0.212	0.209	0.579
	> 500	1405528	70549	0.102	0.386	0.512
Distance from river(meter)	0 - 20	531141	25424	0.139	0.281	0.580
	20 - 50	576381	29642	0.150	0.280	0.570
	50 - 100	622821	41514	0.197	0.262	0.541
	> 200	444273	69738	0.514	0.177	0.309
Aspect	North	92480	13772	0.208	0.106	0.686
	Northeast	168372	22223	0.181	0.104	0.716
	East	234137	13506	0.073	0.115	0.813
	Southeast	436364	17743	0.050	0.125	0.824
	South	449946	33523	0.096	0.112	0.793
	Southwest	368052	39801	0.144	0.101	0.755
	West	174227	16294	0.123	0.109	0.769
	Northwest	97487	9260	0.125	0.110	0.766
Flat	153551	197	0.002	0.120	0.879	
Average annual precipitation(mm)	300 >	803311	2140	0.002	0.312	0.686
	300 - 350	580351	16346	0.018	0.239	0.743
	350 - 400	517161	60634	0.083	0.156	0.761
	400 - 450	236422	68200	0.253	0.122	0.625
	450 - 500	37371	18989	0.644	0.170	0.185
Slope(%)	0 - 5	458589	1269	0.006	0.255	0.739
	5 - 10	407566	2324	0.012	0.245	0.743
	10 - 20	359518	8287	0.049	0.229	0.722
	20 - 40	528433	43362	0.186	0.193	0.621
	> 40	420510	111076	0.747	0.078	0.175
Elevation	1700 >	803311	2140	0.002	0.312	0.686
	1700 - 2000	613228	18509	0.018	0.240	0.742
	2000 -2300	547718	69238	0.083	0.146	0.771
	2300 - 2600	187090	64634	0.304	0.124	0.572
	> 2600	23369	11797	0.178	0.178	0.229

Factor	Class	Total Pixcels	Landslide Pixcels	Mtp(Believe function)	MTp(Unbelieve function)	Mteta(Uncertainty)
Landuse	Poor range	79286	124	0.004	0.149	0.847
	Medium range	737223	94022	0.395	0.091	0.513
	settlement	31080	105	0.009	0.145	0.846
	Irrigation farming	262414	7711	0.082	0.156	0.762
	Dry farming	808960	37563	0.132	0.180	0.688
	River bed	26145	223	0.023	0.145	0.832
	Good range	229508	26570	0.354	0.134	0.512

پهنه‌بندی زمین‌لغزش در منطقه مطالعه‌شده

۶/۲۰٪، ۱۷/۷۸٪، ۳۶/۴۵٪ و ۳۸/۸۲٪ بود. نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش و درصد مساحت طبقات پهنه‌های حساسیت و اندازه زمین‌لغزش رخ داده در هر یک از پهنه‌ها به ترتیب در شکل ۵ جدول ۲ نشان داده شده است.

پهنه‌بندی زمین‌لغزش نشان داد که طبقات حساسیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب ۲۷/۱۰۶٪، ۳۰/۱۴۵٪، ۲۰/۱۶۶٪ و ۱۴/۶۲٪ و ۷/۲۱٪ از منطقه مطالعه‌شده را تشکیل می‌دهند. اندازه زمین‌لغزش رخ داده در هر یک از کلاس‌های حساسیت به ترتیب ۰/۷۵٪،



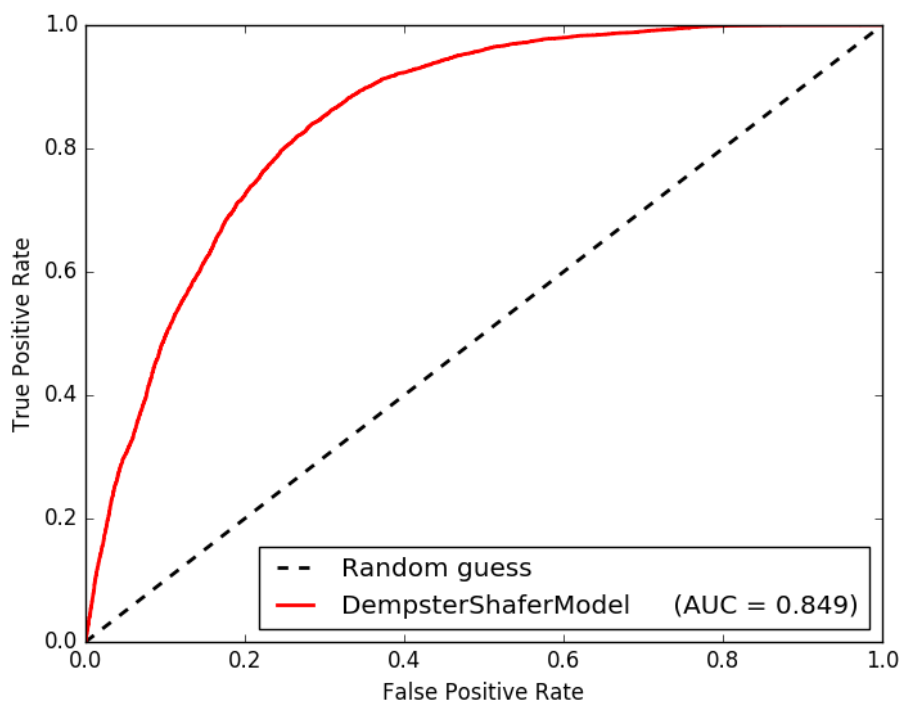
شکل ۵- نقشه پهنه بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل دمپستر-شفر در منطقه مطالعه‌شده.
Figure 5- Landslides susceptibility zonation map using Dempster-Shafer model in the studied area.

جدول ۲- مساحت طبقات پهنه بندی حساسیت لغزش با استفاده از روش دمپستر-شفر.
Table 2- Landslide susceptibility zonation classes area using Dempster-Shafer model.

Landslide (%)	Number of pixels (landslide)	Class (%)	Number of pixels (class)	Susceptibility zone
0.75	1251	27.06	588470	Very low
6.20	10319	30.45	662252	low
17.78	29564	20.66	449172	Medium
36.45	60615	14.62	317872	High
38.82	64569	7.21	156850	Very high

(جدول ۲). اندازه سطح زیر منحنی (AUC) مربوط به نقشه پهنه بندی حساسیت زمین لغزش نیز ۰/۸۴۹ به دست آمد (شکل ۶). این یافته نشان دهنده دقت قابل قبول برای تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش است.

نتایج پهنه بندی با استفاده از مدل دمپستر- شفر نشان داد که ۲۲٪ منطقه مطالعه شده در پهنه های حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار بود. همچنین، ۷۵٪ زمین لغزشها در پهنه های حساسیت زیاد و خیلی زیاد رخ داده اند



شکل ۶- سطح زیر منحنی مربوط به نقشه پهنه بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل دمپستر- شفر در منطقه مطالعه شده.

Figure 6- The area under curve of susceptibility zonation map using Dempster-Shafer model in the studied area.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش بیانگر آن است که ۷۵٪ از زمین‌لغزش‌ها در پهنه‌های حساسیت زیاد و خیلی زیاد بودند و برای بررسی و پهنه‌بندی زمین‌لغزش در منطقه مطالعه‌شده دقت مدل دمپستر-شفر مطلوب بود. بر اساس نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود، در مناطقی که زمین ارزش زیادی دارد و استفاده از زمین‌ها در پهنه‌های حساسیت زیاد ضروری است، قبل از هر گونه بهره‌برداری از زمین، بررسی‌های دقیق و تثبیت شیب انجام شود. همچنین پیشنهاد می‌شود زمین‌های کشاورزی که در پهنه‌های حساسیت زیاد هستند، سامانه آبیاری و نوع کشت متناسب با نوع و درجه ناپایداری اصلاح شود. همچنین مسیر راه‌های

کوهستانی به‌شکلی طراحی شود که از مناطق پایدار عبور کند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسنده مسئول این مقاله اعلام می‌دارد که هیچ‌گونه تضاد منفعی در زمینه نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارد.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

تمامی بخش‌های مقاله به‌وسیله نویسنده مسئول انجام شده است.

فهرست منابع

- Arabameri A, Shirani K. 2016. Identification of effective factors on landslide occurrence and its Hazard zonation using Dempster-Shafer theory, Case study: Vanak Basin, Isfahan Province. *Watershed Engineering and Management*. 8(1): 93-106. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2016.105975>
- Arabameri A, Shirani K, Rezaei K. 2017. A Comparative Assessment between weights-of-evidence and frequency ratio models for landslide Hazard zonation in Vanak Basin. *Journal of Watershed Management Research*. 8(15):147-160. (In Persian). doi:10.29252/jwmr.8.15.147
- Azimpour Moghadam V. 2015. Landslide risk zoning using bayesian and Dempster-Shafer theory (Case study: A part of Babolrud Watershed). Master's Thesis. Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources. University of Sari. 135 p (In Persian).
- Chen W, Pourghasemi HR, Zhao Z. 2016. A GIS-based comparative study of Dempster-Shafer, logistic regression and artificial neural network models for landslide susceptibility mapping. *Geocarto International*. 32(4): 367-385 DOI:10.1080/10106049.2016.1140824
- Crosta G, Clague JJ. 2009. Dating, triggering, modeling, and Hazard assessment of large landslides. *Geomorphology*. 103(1):1-4 DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.04.007
- Devkota K, Regmi AD, Pourghasemi HR, Yoshida K, Pradhan B, Ryu CY, Dhital MR, Althuwayee OF. 2013. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, Index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Natural Hazards*. 65(1):135–165 DOI:10.1007/s11069-012-0347-6
- Hoseinpour Milaghardan A, Delavar M, Chehreghan A. 2016. Uncertainty in landslide occurrence prediction using Dempster–Shafer theory, model. *Earth Syst. Environ*. 2(4):1-10. DOI:10.1007/s40808-016-0240-5
- Khaledi S, Derafshi K, Mehrjounzhad A, Gharch Chahi S. 2012. Assessment of the landslide effective factors and zonation of this event using logistic regression in the GIS environment: The Taleghan Watershed Case Study. *Journal of Geography and Environmental Hazards*. 1(1): 65-82 (In Persian). 10.22067/geo.v1i1.16523
- Komac M. 2006. A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in per alpine Slovenia. *Geomorphology*. 74(1):17-28. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.07.005
- Mahmoudi F. 2007. Dynamic Geomorphology. Payameh Noor University. 326 p. (In Persian).
- Moghimi E, Alavipanah SK, Timuri J. 2009. Evaluation and zonation of effective factors on landslide occurrence of Aladagh northern slopes (Case study: Chenaran drainage basin in north Khorasan Province). *Geographical Research Journal*. 40(64): 53-75. (In Persian).

- Moradi HR, Mohammadi M, Pourghasemi HR, Mustafa Zadeh R. 2010. Landslide risk analysis in Golestan province using Dempster-Shafer theory. *Researches in Earth Sciences*. 1(3): 1-14
- Park NW. 2011. Application of Dempster-Shafer theory of evidence to GIS-based landslide susceptibility analysis. *Environmental Earth Science*. 62(2): 367-376. DOI:10.1007/s12665-010-0531-5
- Pourghasemi HR. 2007. Landslide risk assessment using fuzzy logic (Case study of part of Haraz Watershed). Master Thesis, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University. 92 p. (In Persian).
- Pourghasemi HR, Moradi HR, Fatemiaghda S, Gokceoglu C, Pradhan, B. 2013. GIS-based landslide susceptibility mapping with probabilistic likelihood ratio and spatial multi-criteria evaluation models (North of Tehran). *Arabian Journal of Geosciences*. 7(5): 1857-1878. DOI:10.1007/s12517-012-0825-x
- Roostaei S, Jananeh C. 2020. Slope instability hazard zonation in Baleghluchai watershed in Ardabil using AHP Fuzzy method. *The Journal of Geography and Planning*. 23(70): 169-188
- Rowshanzamir S. 2008, Research project, Investigation of effective factors on landslides in Maragheh Saveh Basin. Payame Noor University. 74 p. (In Persian).
- Saberchenari K, Soleimani H, Maryam Sadat Mirabdini MS. 2017. Landslide risk zoning using Demester-Shafer theory, Case study: Ziarat Watershed, Golestan Province. *Geological Engineering*. 11(4): 385-404. (In Persian).
- Shariat jafari M. 1996. Landslide (Basics and principles of Stability of natural slopes). Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. 218p. (In Persian).
- Servati MR, Hosseinzadeh MM, Khezri S, Mansouri A. 2008, The zoning of mass movement in Sanandaj-Dehgolan road using analytical hierarchy process (AHP). *Geographical Data (SEPEHR)*. 17(68): 25-32 (In Persian).
- Shirani K, Chavoshi S, Ghayoumian J. 2006. Investigation and evaluation of landslide risk zoning methods in semirom upper Padna. *Research Journal of University of Isfahan "Science"*. 23(1): 23-38. (In Persian).
- Shirani K, Pasandi M, Arabameri A. 2018. Landslide susceptibility assessment by Dempster-Shafer and index of entropy models, Sarkhoun Basin, Southwestern Iran. *Natural Hazards*. 93(3): 1379-1418 DOI:10.1007/s11069-018-3356-2
- Taghavimoghadam E, Kalali Moghadam Z, Pourhashemi S, Motamedi Rad M. 2013, Landslide risk zoning in mirabad neyshabour basin using the method AHP in GIS invironment. 8th Conference of the Iranian Association of Engineering Geology and the Environment. 16p (In Persian).
- Wang Q, Li W, Wu Y, Pei Y, Xing M, Yang D. 2016. A comparative study on the landslide susceptibility mapping using evidential belief function and weight of evidence models. *Journal of Earth System Science*. 125(3): 646-662. DOI:10.1007/s12040-016-0686-x
- Xu C, Xu X, Dai F, Saraf AK. 2012. Comparison of different models for susceptibility mapping of earthquake triggered landslides related with the 2008 Wenchuan earthquake in China. *Computers and Geosciences*. 46: 317-329. DOI: 10.1016/j.cageo.2012.01.002
- Yalcin A, Reis S, Aydinoglu A, Yomralioglu T. 2011. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*. 85(3): 274-287.
- Yesilnacar EK. (2005). The Application of computational intelligence to landslide susceptibility mapping in Turkey, Ph.D Thesis Department of Geomatics the University of Melbourne. 423 p.
- Youssef AM, Pourghasemi HR, El-Haddad BA, Dhahry BK. 2016. Landslide susceptibility maps using different probabilistic and bivariate statistical models and comparison of their performance at Wadi Itwad Basin, Asir region, Saudi Arabia. *Bull Eng Geol Environmental*. 75(1): 63-87. DOI:10.1007/s10064-015-0734-9



Investigation of Effective Factors on Landslide Occurrence and Susceptibility Zonation Using the Dempster-Shafer Model in the Middle Mazlaghan Chai, Markazi Province

Soheila Rowshanzamir[✉]

Lecturer of Geography Department, Pyame Noor University, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Middle Mazlaghan Chai watershed located in west of Saveh county. The activity of faults and the presence of sensitive rocks have created suitable conditions for the occurrence of small and large landslides. One of the important strategies for reducing losses caused by landslides is avoiding high-risk and very high-risk areas. For this purpose, it is necessary to prepare a relatively accurate landslide susceptibility zoning map from among the existing methods. One of the best methods for landslide zonation is the Dempster-Shafer model. The purpose of this research is determination of the factors affecting the occurrence of landslide, presentation and evaluation of the landslide susceptibility zonation map using the Dempster-Shaffer method and area under curve (AUC), respectively in Middle Mazlaghan Chai.

Materials and Methods

The Middle Mazlaghan Chai watershed, with an area of 21,746 ha, is located in Markazi Province. Maximum elevation is 2833 m above sea level in the northern heights of the watershed and minimum elevation is 1399 m at the outlet of the Bivaran River. The average annual temperature of the study area is 13 °C and the average annual precipitation varies from 246 mm in the south to 500 mm in the north. The climate of the region is arid and semi-arid. 52% of the soils in the study area are in the type of entisol and without profile development, and 37% of the vegetation cover consists of moderate and poor rangeland. Initially, a landslide inventory map was prepared in environment of geographic information system using fieldworks, aerial photography and satellite imagery. Then using fieldworks and related research, the most important factors affecting landslides in the study area, including slope, aspect, elevation, distance to fault, distance to road, distance from stream, land-use, lithology and precipitation were investigated and determined.

Article Type: Research Article

***Corresponding Author E-mail:** s_roshanzamir@pnu.ac.ir

Citation: Rowshanzamir, S. 2025. Investigation of Effective Factors on Landslide Occurrence and Susceptibility Zonation Using the Dempster-Shafer Model in the Middle Mazlaghan Chai, Markazi Province. *Watershed Management Research*. 38(1): 113-127.

DOI: 10.22092/wmrj.2023.360607.1502

Received: 16 November 2022, **Received in revised form:** 05 December 2023, **Accepted:** 21 December 2023 **Published online:** 21 March 2025

Watershed Management Research, Vol.38, No.1, Ser. No:146, Spring 2025, pp. 113-127.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center

© Author(s)



After preparing the information layers and weighting in the GIS, a landslide susceptibility zonation map was prepared and classified using Dempster Shafer method. Finally, the efficiency of the Dempster Shafer method was evaluated using the area under curve (AUC).

Results and Discussion

Fossiliferous limestone units and tuff and lava alternations showed the highest susceptibility to landslides. The results of this research showed the most landslides occurred more than 100 m from streams and at distances greater than 200 m from the roads and faults. Slopes more than 40% are most susceptible to landslides. The northern aspect, elevation more than 2600 m, and precipitation more than 450 mm also showed the highest susceptibility to landslides in the studied area. The zoning results showed that about 22% of the study area is located in high and very high susceptibility zones and approximately 75% of landslides occurred in high and very high susceptibility zones. The area under the curve of the landslide susceptibility zonation map was also obtained 0.849.

Conclusion and Suggestions

Accurate identification of landslide locations using GPS device is one of the results obtained from this research. As a result, the landslide distribution map of 192 landslides was prepared and it was checked and recorded for the first time in the study area. Among the lithological units, fossiliferous limestone units and alternations of tuff and lava showed the highest susceptibility to landslide, and the landslide susceptibility zones are in complete relation to the geological structures of the region. It is suggested that this model be compared with other models and the results of this research will be used as basic information for environmental management and planning.

Keyword: Dempster-Shafer model, effective factors on landslide, landslide susceptibility zonation, Middle Mazlaghan Chai

Article Type: Research Article

Conflicts of interest:

The corresponding author 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

All parts of the article were written by the corresponding author.



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی

پیش‌بینی رسوبات معلق با استفاده از مدل ترکیبی منحنی سنجۀ رسوب و شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه نارون افجه

گللاه غفاری ^{ID}

استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

غلظت رسوبات معلق، یکی از مهم‌ترین سنجه‌های کیفی آب در منابع آب سطحی و یک پدیده آب‌شناختی مهم است. روش‌های سنتی پیش‌بینی مانند منحنی‌های سنجۀ رسوب به دلیل در نظر نگرفتن تمام سنجه‌های مؤثر، دقت کافی ندارند. در این راستا، مدل‌های ترکیبی شامل منحنی‌های سنجۀ رسوب (SRC) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) به‌عنوان روشی نوین برای پیش‌بینی دقیق‌تر غلظت رسوبات معلق پیشنهاد شده‌اند. این مدل‌ها با توانایی یادگیری الگوهای پیچیده و غیرخطی، به‌مراتب عملکرد بهتری در مقایسه با روش‌های سنتی دارند. این پژوهش با هدف توسعه و کاربرد مدل ترکیبی SRC-ANN برای پیش‌بینی غلظت رسوبات معلق انجام شد. همچنین، پیش‌بینی شد این مدل با ترکیب نقاط قوت هر دو روش، دقت پیش‌بینی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد و در مدیریت بهینه منابع آب و عملکرد صحیح سازه‌های آبی سودمند باشد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، مدل ترکیبی جدیدی متشکل از منحنی سنجۀ رسوب و شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی دقیق‌تر غلظت رسوبات معلق در ایستگاه آب‌سنجی نارون (افجه) استفاده شد. برای این منظور، از داده‌های آب‌دهی جریان و رسوب معلق ۲۲۲ نمونه در دوره ۵۰ ساله (۱۳۵۰ تا ۱۴۰۰) استفاده شد. همچنین، ۱۴ روش گوناگون شامل ۶ مدل منحنی سنجۀ رسوب، ۶ مدل شبکه عصبی مصنوعی و ۲ مدل ترکیبی برای شبیه‌سازی رسوبات معلق به‌کار گرفته شد و عملکرد هر روش با استفاده از معیارهای آماری مانند ضریب تعیین (R^2)، ضریب کارایی (ME) و میانگین درصد خطای نسبی (RME) ارزیابی شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: g.ghaffari@areeo.ac.ir

استناد: غفاری، گ. ۱۴۰۴. پیش‌بینی رسوبات معلق با استفاده از مدل ترکیبی منحنی‌سنجۀ رسوب و شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه نارون افجه. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۸(۱): ۱۴۶-۱۲۸.
شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2024.366243.1589

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۴، دوره ۳۸، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۴۶، بهار ۱۴۰۴، صفحه‌های ۱۲۸ تا ۱۴۶.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



نتایج و بحث

نتایج نشان داد که در میان روش‌های منحنی سنجه رسوب، دقیق‌ترین شبیه‌سازی از وضعیت آب‌دهی رسوب مشاهده‌شده در مقایسه با دیگر روش‌ها مربوط به روش میانگین دسته‌ها با ضریب تعیین (R^2) ۰/۸۴، ضریب کارایی (ME) ۰/۸۲ و میانگین درصد خطای نسبی (RME) ۲۱۱/۸۷ بود. همچنین، در میان روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، دقیق‌ترین شبیه‌سازی مربوط به روش CANFIS با ضریب کارایی (ME) ۰/۸۱۲۳ و میانگین درصد خطای نسبی (RME) ۲۴۸/۷۲ بود. سرانجام، به‌منظور بهبود نتایج پیش‌بینی‌ها از مدل‌های ترکیبی ۱ و ۲ استفاده شد. نتایج نشان داد که بهترین برآورد از رسوب معلق مربوط به روش ترکیبی ۱ با ضریب

کارایی (ME) ۰/۸۷۶۱ و میانگین درصد خطای نسبی (RME) ۵۹/۶۳ بود.

در روش نامبرده هم برآورد اندازه‌های آب‌دهی‌های اوج و هم برآورد اندازه‌های آب‌دهی‌های پایه بسیار دقیق بود و به‌عنوان دقیق‌ترین روش برای پیش‌بینی رسوبات معلق معرفی شد. این نتایج بیانگر آن بود که با استفاده از مدل ترکیبی ۱ می‌توان دقت پیش‌بینی‌ها را به‌طور قابل توجهی بهبود داد و میان داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های مشاهده‌شده تناسب بهتری ایجاد کرد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

از میان روش‌های منحنی سنجه رسوب، روش منحنی سنجه رسوب میانگین دسته‌ها به‌دلیل در نظر گرفتن توزیع داده‌ها و انعطاف‌پذیری، به‌عنوان بهترین روش برای پیش‌بینی رسوب معلق معرفی شد. عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز در شبیه‌سازی رسوبات معلق مربوط به آب‌دهی‌های پایه و بهنجار خوب بود، اما در پیش‌بینی رسوبات معلق در شرایط سیلابی ضعیف‌تر عمل کرد. دقیق‌ترین روش برای پیش‌بینی رسوب معلق، مدل ترکیبی ۱ معرفی شد که در آن از ترکیب روش‌های منحنی سنجه و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. انتخاب روش نامناسب برای پیش‌بینی رسوبات می‌تواند منجر به نتایج نادرست شود. همچنین، بررسی تأثیر متغیرهای دیگر افزون بر آب‌دهی جریان بر رسوب نیز ضروری است. نتایج این پژوهش نشان داد می‌توان با استفاده از مدل‌های ترکیبی دقت پیش‌بینی رسوبات معلق را به‌طور قابل توجهی افزایش داد و از آن به‌عنوان ابزاری مؤثر برای مدیریت و پیش‌بینی رسوبات معلق و بهبود مدیریت منابع آب استفاده کرد. پیشنهاد می‌شود برای توسعه و بهینه‌سازی روش‌های ترکیبی، در ایستگاه‌های آب‌سنجی به‌ویژه در آب‌دهی‌های زیاد و شرایط سیلابی، از امکانات پیشرفته نمونه‌گیری و تعداد نمونه‌های بیشتر استفاده شود. همچنین، پیشنهاد می‌شود مهندسان و مدیران منابع آب از نتایج این پژوهش برای توسعه راهکارهای بهینه برای مدیریت رسوبات معلق، بهره‌برند.

واژگان کلیدی: ایستگاه آب‌سنجی، آب‌دهی، شبیه‌سازی، غلظت رسوب، مدل‌سازی

مقدمه

غلظت رسوبات معلق، یکی از مهم‌ترین سنجه‌های کیفی آب در منابع آب سطحی و یک پدیده آب‌شناختی مهم است (ژنگ ۲۰۲۳). همچنین، در تعامل با ویژگی‌های مشخصات جریان، فرسایش، انتقال رسوب و طراحی زیرساخت‌ها، بر پایداری مهندسی رود نیز تأثیرگذار است (هورنیک و همکاران ۱۹۸۹). اندازه‌های زیاد غلظت رسوبات معلق می‌تواند بر زیرساخت‌ها مانند سدها، کارایی و طول عمر آنها تأثیرگذار باشد. کیفیت آب رودها برای حفظ بوم‌نظام‌ها و فعالیت‌های انسانی

بسیار مهم است (جورج ۱۹۸۹). آلاینده‌های موجود در آب می‌توانند زیرساخت‌ها را نابود کنند و به حیات آبریان آسیب برسانند. درک الگوها و تغییرات جریان برای مهندسی مؤثر رودها ضروری است. نوسانات جریان می‌تواند بر انتقال رسوب، فرسایش و فرآیندهای رسوب تأثیرگذار باشد. فرسایش در امتداد ساحل رودها و پویایی انتقال رسوب بر پایداری کانال‌های رود تأثیرگذار است (کریستین و همکاران ۱۹۹۸). مدیریت صحیح حمل و نقل رسوب برای حفظ قابلیت کشتیرانی و مهار سیل حیاتی است و در طراحی سازه‌هایی مانند پل‌ها،

برای مدل‌های منحنی سنجه ۸۷/۱٪ و روش وایزی آماری ۹۰٪ بود. لی و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که دقت مدل‌های ترکیبی برای پیش‌بینی رسوبات معلق در مقایسه با مدل‌های تک منظوره، بیشتر بود و پس از استفاده از مدل‌های ترکیبی ضریب کارایی مدل ناش-ساتکلیف (NSE) از ۰/۷۶ به ۰/۸۹ افزایش یافت. در هند سنتی کومار و همکاران (۲۰۲۱) با تلفیق مدل‌های منحنی سنجه رسوب و ماشین بردار پشتیبان، مدلی با دقت بیشتر برای پیش‌بینی رسوبات رود کآوری پیشنهاد دادند. در کره جنوبی، لی و همکاران (۲۰۲۱) از ترکیب مدل‌های منحنی سنجه رسوب و شبکه عصبی برای پیش‌بینی رسوبات معلق رود هان استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد دقت مدل پیشنهادی در مقایسه با مدل‌های جداگانه بیشتر بود و میانگین خطای مطلق (MAE) از ۲۳۴ به ۱۶۷ کاهش یافت. ونگ و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از دستورالعمل یادگیری عمیق و داده‌های سنجش‌ازدور، یک مدل برآوردگر رسوبات معلق بر پایه هوش مصنوعی توسعه دادند که ضریب کارایی ناش-ساتکلیف (NSE) آن ۰/۹۳ و میانگین خطای مطلق (MAE) ۴۳ به دست آمد. ژنگ (۲۰۲۳) رسوبات معلق را با استفاده از هوش مصنوعی در آبخیز وی جیا بون پیش‌بینی کردند و با استفاده از سری زمانی ماهانه مشاهده شده آب‌دهی رود و رسوبات معلق نمودند و کارایی مدل با استفاده از ضریب کارایی مدل ناش-ساتکلیف (NSE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند به‌عنوان ابزاری مناسب برای پیش‌بینی رسوبات معلق استفاده شود. مرادی نژاد و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی اقدام به بررسی کارایی روش‌های برآورد رسوب معلق در ایستگاه پل دوآب رود قره چای در دو سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۶ نمودند و برای این هدف از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، نروفازی، منحنی سنجه رسوب و همچنین مدل وایزی چندمتغیره استفاده نمودند. نتایج نشان داد که روش نروفازی بر اساس ورودی‌های آب‌دهی و رسوب و مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی بر اساس ورودی‌های آب‌دهی، نسبت به وایزی چند

آبشارها و سنگ‌ها باید نیروهای آبی و بارهای رسوب را در نظر گرفت (آی‌تک و اوزگور ۲۰۰۸). از این‌رو، پیش‌بینی دقیق رسوبات معلق برای مدیریت بهینه منابع آب و عملکرد صحیح سازه‌های آبی اهمیت زیادی دارد. رسوبات معلق شامل روش‌های آماری، معادلات وایزی و منحنی‌های سنجه رسوب است. اما، این روش‌ها به دلیل در نظر نگرفتن تمام سنجه‌های مؤثر، دقت کافی ندارند (چن و چاو ۲۰۰۶)، از این‌رو، در دو دهه گذشته، به استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی همچون شبکه‌های عصبی مصنوعی توجه فراوانی شده است. شبکه‌های عصبی با توانایی یادگیری الگوهای غیرخطی پیچیده، عملکرد بهتری در مقایسه با روش‌های سنتی دارند (سیگیزلو ۲۰۰۵). از سوی دیگر، ترکیب روش‌های سنتی با دستورالعمل‌های هوش مصنوعی می‌تواند منجر به بهبود قابل توجهی در دقت پیش‌بینی‌ها شود. در سال‌های گذشته، استفاده از مدل‌های ترکیبی و هوش مصنوعی برای پیش‌بینی رسوبات معلق رواج یافته است. در پژوهش‌های پرشماری گزارش شده است که دقت این مدل‌ها در مقایسه با روش‌های سنتی بیشتر است. در این راستا، ایرانی و همکاران (۲۰۱۹)، به منظور برآورد بار معلق رسوب در آبخیز قره‌سو از روش منحنی سنجه رسوب استفاده کردند. این پژوهشگران از داده‌های رسوب دوره ۲۶ ساله ۱۳۹۶-۱۳۷۰ در ایستگاه آب‌سنجی دوآب مرک استفاده کردند و با تجزیه و تحلیل روابط وایزی و رسم منحنی سنجه‌های یک خطی، دو خطی، و حد میانگین دسته‌ها دریافتند که بیشترین دقت در برآورد آب‌دهی رسوب مربوط به روش حد وسط دسته‌ها با R^2 برابر ۰/۹۸ بود. در استان مازندران، مردوخ‌پور و همکاران (۲۰۱۹) اندازه برآورد رسوب را با بهره‌گیری از روش منحنی سنجه و مقایسه نتایج با روش‌های وایزی و شبکه عصبی مصنوعی در رود بابل را ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که غلظت بار معلق رسوب به دست آمده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی به داده‌های واقعی غلظت رسوب نزدیک‌تر بود و ضریب همبستگی از شبکه عصبی مصنوعی ۰/۹۲/۸ به دست آمد. این در حالی بود که ضریب همبستگی

رسوب معلق در مقایسه با وایازی چند خطی سنتی نشان دادند (بسطامی و فاتیح ۲۰۲۴).

بر پایه پژوهش‌های انجام‌شده مدل‌های ترکیبی و هوش مصنوعی می‌توانند ابزارهای قدرتمندی برای پیش‌بینی رسوبات معلق در رودها باشند. دقت این مدل‌ها در مقایسه با روش‌های سنتی بیشتر است و در حل چالش‌های مرتبط با پیش‌بینی رسوبات معلق سودمند است و می‌توان در مدیریت بهتر منابع آب و حفظ محیط زیست از آنها بهره برد.

در مدل‌های ترکیبی، روش‌های گوناگون پیش‌بینی را با یکدیگر ترکیب می‌کنند تا از مزایای هر روش بهره‌مند شوند. در مدل‌های هوش مصنوعی نیز از دستورالعمل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی رسوبات معلق استفاده می‌شود. استفاده از مدل‌های ترکیبی برای پیش‌بینی رسوبات معلق مزایای پرشماری مانند دقت بیشتر، نیاز به داده‌های میدانی کمتر، پیچیدگی کمتر در محاسبات و امکان پیش‌بینی در مقیاس‌های زمانی و مکانی متفاوت دارد.

در این راستا، هدف این پژوهش، پیشنهاد یک مدل ترکیبی نوین برای پیش‌بینی دقیق غلظت رسوبات معلق با استفاده از منحنی سنجه رسوب و شبکه عصبی مصنوعی بود. همچنین، پیش‌بینی شد عملکرد این مدل ترکیبی، در مقایسه با مدل‌های سنتی و ANN جداگانه بهتر باشد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعه‌شده

در این پژوهش، از داده‌ها و اطلاعات مربوط به ایستگاه آب‌سنجی نارون (افجه) که در زیر آبخیز افجه، یکی از زیرآبخیزهای اصلی آبخیز سد لتیان در استان تهران است، استفاده شد. آبخیز سد لتیان با مساحت ۶۹۶۸۱ هکتار در منطقه‌ای کوهستانی با شیب زیاد و بلندی ۲۵۵۵ متر از سطح دریا است. اقلیم غالب منطقه در بلندی‌های بیش از ۲۰۰۰ متر مرطوب فراسرد و در مناطق با بلندی کمتر از ۲۰۰۰ متر نیمه‌مرطوب فراسرد است.

متغیره و منحنی سنجه رسوب، دارای دقت مطلوب‌تری بود. برای اندازه‌های بالاتر از میانگین درازمدت سری آماری، اندازه‌های شبیه‌سازی‌شده با مدل شبکه عصبی مصنوعی و برای اندازه‌های پایین‌تر از میانگین و بار رسوب سالانه هم برآورد نروفازی نسبت به اندازه‌های مشاهداتی نزدیک‌تر بود. درحالی‌که برای اندازه‌های حدی بیشینه، تفاوت معنی‌داری میان مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، نروفازی و وایازی خطی مشاهده نشد (مرادی نژاد و همکاران ۲۰۲۳).

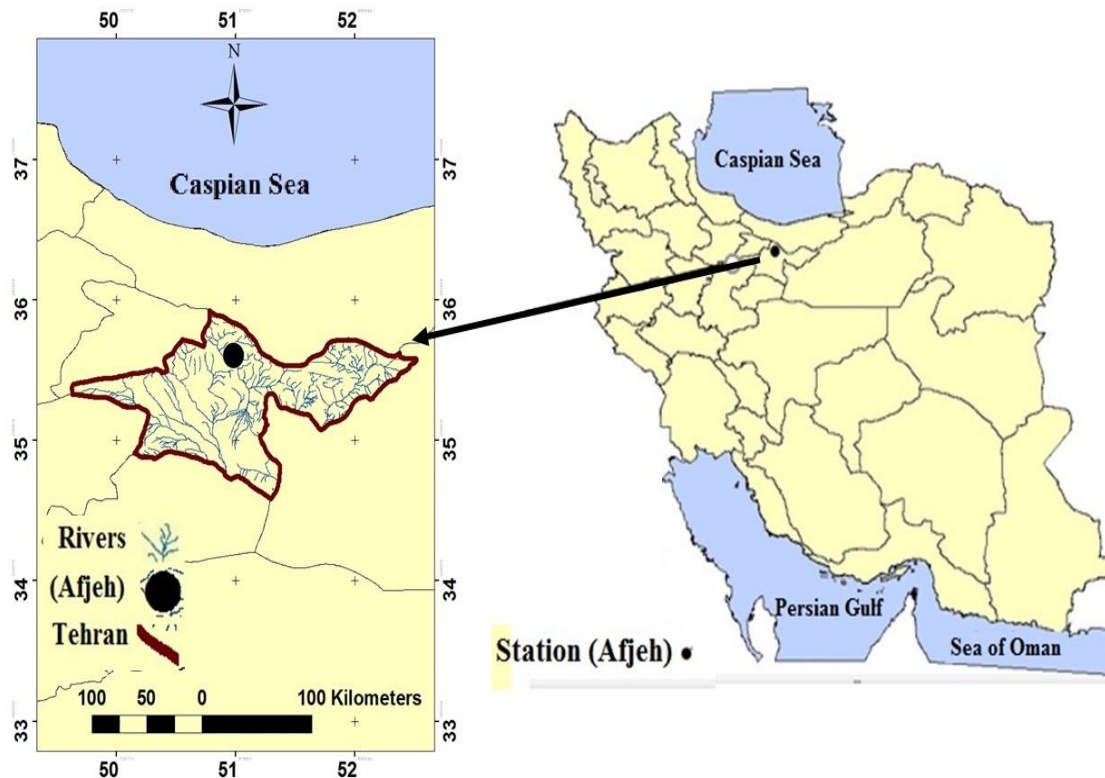
بالول و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی اقدام به برآورد رسوب معلق در آبخیز ایسر در شمال‌غربی الجزایر با استفاده از روش‌های منحنی سنجه نمودند. آنها در مجموع ۲۰۲۶ جفت داده‌های آب‌دهی آب و غلظت رسوب معلق را از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۰۴ برای تجزیه و تحلیل استفاده نمودند. در این مطالعه داده‌ها به چهار مقیاس زمانی کل دوره، سالانه، فصلی و ماهانه تقسیم شدند تا تأثیر زمان بر برآورد رسوب را ارزیابی کنند. نتایج به‌دست آمده نشان داد مدل توانی خطی در داده‌های ماهانه بهترین برآورد عملکرد کل رسوب معلق را با نرخ خطای ۱۶٪ - ارائه داد. مدل‌های توسعه یافته در مقیاس فصلی کارایی بالایی داشتند و ضرایب نزدیک به ۰/۹۵ را نشان داد که نشان دهنده عملکرد پیش‌بینی دقیق مدل است (بالول و همکاران ۲۰۲۳).

بسطامی و فاتیح (۲۰۲۴) در پژوهشی اقدام به برآورد بار رسوب معلق با استفاده از روش‌های سنتی وایازی چند خطی و یادگیری ماشین مانند ماشین‌های بردار پشتیبانی و درخت تصمیم M5 نمودند و برای پیش‌بینی تخلیه روزانه رسوب معلق از داده‌های ورودی مانند آب‌دهی روزانه رود، دمای آب و غلظت رسوب معلق استفاده شد. برای مقایسه عملکرد روش‌ها از معیارهای ارزشیابی نظیر ضریب تعیین، خطای میانگین مربعات ریشه و میانگین خطای مطلق استفاده شد. نتایج آنها نشان داد که به‌طور کلی، رویکردهای یادگیری ماشین، به‌ویژه ماشین‌های بردار پشتیبانی و درخت تصمیم M5 قابلیت پیش‌بینی بهتری برای تخلیه

جدول ۱- چکیده‌ای از خصوصیات گیتاشناسی آبخیز افجه.

Table 1- Summary of physiographic characteristics of the Afjeh Watershed.

Area (km ²)	Perimeter (km)	Compactness coefficient (Cc)	Time of concentration (Tc)	Slope S (%)	Drainage Density (D)	Basin Length (km)
40.6	33	1.45	15	9.2	0.74	13



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعه شده در کشور.

Figure 1- Location of the study area in the country.

۱- منحنی‌های سنجه رسوب

در این روش، رابطه‌ای تجربی میان آبدهی جریان و آبدهی رسوب برقرار می‌شود. برای رسم منحنی سنجه رسوب از روش اداره اصلاح اراضی آمریکا استفاده می‌شود. در این روش با انتقال داده‌های هم‌زمان آبدهی جریان و غلظت رسوب معلق متناظر با آن روی صفحه مختصات لگاریتمی و رسم بهترین خط از میان ابر داده‌ها، بر مبنای روش حداقل مربعات، معادله‌نمایی منحنی سنجه رسوب به دست می‌آید. این روش با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای، منحنی‌هایی را برای پیش‌بینی اندازه رسوبات معلق در آبدهی‌های گوناگون پیشنهاد می‌دهد. ابتدا داده‌های موجود دسته‌بندی شده و منحنی‌های سنجه بر اساس آن‌ها رسم می‌شود (لدنزا

در این پژوهش، برای تحلیل و پیش‌بینی رسوبات معلق، از داده‌های ایستگاه آب‌سنجی نارون (افجه) استفاده شد. ابتدا، آمار موجود از نظر پیوستگی، داده‌های پرت، کیفیت و همگنی در طول دوره آماری بررسی شد تا از داده‌های قابل اعتماد و منسجم اطمینان به دست آید. داده‌های متناظر آبدهی جریان (برحسب مترمکعب در ثانیه) و آبدهی رسوب (برحسب تن در روز) مربوط به ۲۲۲ نمونه که به‌طور هم‌زمان از سال ۱۳۵۰ تا ۱۴۰۰ اندازه‌گیری شده بودند، استفاده شد. سپس، سه روش گوناگون برای شبیه‌سازی رسوبات معلق به کار گرفته شد که شامل منحنی‌های سنجه رسوب، شبکه‌های عصبی مصنوعی و روش‌های ترکیبی بودند.

ث- ضریب اصلاحی سنجهای

برای اصلاح اثر تبدیل لگاریتمی (توماس ۱۹۸۵) به نقل از میلر (۱۹۵۳) ضریب اصلاحی (۲) را پیشنهاد کرد.

$$CF_1 = EXP[2.65S^2] \quad (2)$$

S: اشتباه استاندارد برآورد منحنی سنجۀ رسوب در لگاریتم پایه ۱۰ است و با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$S^2 = \frac{\sum (\log c_i - \log \hat{c}_i)^2}{(n - 2)} \quad (3)$$

N: تعداد نمونه‌های غلظت، $\log \hat{c}_i$: لگاریتم اندازه برآوردی غلظت و $\log c_i$: لگاریتم اندازه مشاهده‌ای غلظت است (بالول و همکاران ۲۰۲۳).

ج- ضریب اصلاحی غیر سنجهای

کوخ و اسمیلی (۱۹۸۶) با رد توزیع بهنجار خطاهای باقی‌مانده، ضریب اصلاحی غیر سنجهای CF_2 را برای حذف اریبی داده‌ها توصیه کرد که با استفاده از رابطه ۴ و ۵ محاسبه می‌شود (هین و لی ۲۰۲۳).

$$CF_2 = \frac{1}{n} \sum 10^{\varepsilon_i} \quad (4)$$

$$\varepsilon_i = \log c_i - \log \hat{c}_i \quad (5)$$

ε_i : خطای برآورد و بقیه علائم مشابه قبل است.

۱- استفاده از روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی

این روش به‌منظور مدل‌سازی پیچیدگی‌های موجود در روابط میان آب‌دهی جریان و آب‌دهی رسوب استفاده شد. شبکه‌های عصبی با قابلیت یادگیری و تطبیق با داده‌های پیچیده، توانایی پیش‌بینی دقیق‌تری در مقایسه با روش‌های سنتی دارند. در این پژوهش، شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از داده‌های آموزشی تنظیم و بهینه‌سازی شد. سپس، برای پیش‌بینی آب‌دهی رسوب استفاده شد. در روش شبکه عصبی ابتدا برای آموزش شبکه تعدادی از داده‌ها که معرف شرایط مسئله بودند برای آموزش انتخاب شد و دیگر داده‌ها برای آزمون عملکرد شبکه آموزش‌دیده به‌کار برده شدند. نکته مهم در انتخاب داده‌های آموزش آن بود که گستره وسیعی از انواع داده‌ها را شامل شود. در این پژوهش ۷۵٪ داده‌ها به‌عنوان داده‌های آموزشی استفاده شد و ۲۵٪ داده‌ها برای آزمون کارایی مدل شبکه عصبی

و لاپولیتانو (۲۰۰۶). سپس، دقت این منحنی‌ها با استفاده از معیارهای آماری گوناگون ارزیابی می‌شود. برای این منظور در این پژوهش از ۶ نوع منحنی سنجۀ رسوب به‌شرح زیر استفاده شد.

الف- منحنی سنجۀ رسوب یک‌خطی

در این روش معمولاً داده‌های غلظت یا آب‌دهی رسوب و آب‌دهی جریان متناظر آن‌ها به یک محور مختصات تمام لگاریتمی منتقل می‌شود و بهترین خط برازش با استفاده از روش حداقل مربعات از میان نقاط، عبور داده می‌شود (بالول و همکاران ۲۰۲۳).

ب- عبور دادن بیش از یک خط از میان نقاط

گاهی پراکنش نقاط روی نمودار به شکلی است که امکان برازش یک خط مستقیم به آن وجود ندارد. در این حالت اگر وضعیت پراکنش نقاط اجازه دهد، می‌توان مجموعه نقاط را به چند دسته تقسیم کرد و به هر یک خط مستقیم جداگانه‌ای برازش داد.

پ- روش میانگین دسته‌ها

در این روش که آنرا جانسون (۱۹۹۶) پیشنهاد کرد، آب‌دهی‌های جریان با یک نمو معین به تعدادی دسته تقسیم می‌شود و برای آب‌دهی میانگین هر دسته، آب‌دهی رسوب میانگین اندازه‌گیری‌شده همان دسته تعیین می‌شود و سرانجام منحنی سنجۀ رسوب با استفاده از آن‌ها با روش حداقل مربعات به‌دست می‌آید.

ت- ضریب اصلاحی فائو

در این روش ابتدا بهترین خط با معادله $Q_s = aQ_w^b$ در روش حداقل مربعات به اندازه‌های لگاریتمی (نه اندازه‌های واقعی) Q_s غلظت رسوب و Q_w آب‌دهی برازش داده می‌شود. ولی از معادله نامبرده که از نقاط میانگین $\log Q_s$ و میانگین $\log Q_w$ عبور می‌کند، استفاده نمی‌شود و به‌جای آن معادله خطی موازی که از میانگین Q_s و میانگین Q_w متناظر با آن می‌گذرد، استفاده می‌شود. از این‌رو، معادله جدید به‌شکل رابطه ۱ است.

$$Q_s = aQ_w^b \quad (1)$$

اندازه \hat{a} از تقسیم میانگین Q_s بر میانگین Q_w ‌های متناظر اندازه‌گیری‌شده به‌دست می‌آید (لدنزا و لاپولیتانو ۲۰۰۶).

این خطا به روزرسانی می‌شود (ریشاب و همکاران ۲۰۲۴).

۳- شبکه عصبی پیش‌خور تعمیم‌یافته (GFF)^۲

شبکه عصبی پیش‌خور تعمیم‌یافته (GFF) یک معماری شبکه عصبی است که در آن اتصالات لایه‌ها محدود به لایه بعدی نیستند، بلکه می‌توانند از هر لایه به گره‌های چندین لایه بالاتر متصل شوند و لازم نیست فقط به لایه بعدی وصل شوند. در مقایسه با شبکه‌های پیش‌خور معمولی که در آن‌ها اتصالات فقط به لایه بعدی است، با این ساختار می‌توان انعطاف‌پذیری بیشتری برای یادگیری الگوهای پیچیده فراهم کرد (جانوس و همکاران ۲۰۱۳).

۴- شبکه عصبی تابع پایه شعاعی (RBF)^۳

معماری این شبکه شامل یک لایه ورودی، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی است. در لایه پنهان، هر نرون از یک تابع پایه شعاعی مانند تابع گوسی به‌عنوان تابع فعال‌سازی استفاده می‌کند. با تابع RBF فاصله میان ورودی و یک نقطه مرجع (مرکز)، محاسبه می‌شود و خروجی آن بر اساس این فاصله تعیین می‌شود. مراکز نرون‌های لایه پنهان معمولاً با استفاده از دستورالعمل‌هایی مانند k-means روی داده‌های آموزشی تعیین می‌شوند (سریلانها و سودها ۲۰۲۴).

۵- شبکه‌های عصبی خودسازمان‌دهنده

(SOFMs)^۴

این روش یک روش یادگیری ماشین بدون نظارت است که برای تولید نمایش کم‌بعدی (معمولاً دو بعدی) از داده‌های بعد بیشتر، درحالی‌که ساختار پستی‌بلندی داده‌ها حفظ می‌شود، استفاده می‌شود. در SOFMs از یادگیری رقابتی به‌جای یادگیری اصلاح خطا مانند پس انتشار استفاده می‌شود (پورخسرویان و همکاران ۲۰۲۴).

۶- شبکه عصبی (CANFIS)^۵

می‌توان با این شبکه و ترکیب شبکه‌های عصبی (ANN) و سامانه‌های استنتاج فازی (FIS) عملکرد شبکه را بهبود بخشید و از وزن‌های وابسته به الگو میان

استفاده شد. سنجه‌های مؤثر در مدل‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی شامل ساختار شبکه عصبی، ورودی‌های اعمال‌شده، شیوه آموزش و تعداد بردارهای خروجی هر شبکه، تعداد لایه‌های مخفی، تعداد نرون‌های لایه‌ها و تعداد نرون‌های لایه‌های میانی بودند (مصطفی و همکاران ۲۰۲۴). در این پژوهش داده‌های آب‌دهی (مترمکعب در ثانیه) و رسوب هم‌زمان لحظه‌ای (تن در روز) به‌ترتیب به‌عنوان عناصر ورودی و خروجی ساختار در نظر گرفته شد. برای این منظور ابتدا، داده‌ها تصادفی شدند. سپس، بهنجارسازی داده‌ها قبل از استفاده در شبکه (این کار به‌ویژه زمانی که دامنه تغییرات ورودی‌ها زیاد باشد کمک شایانی به آموزش بهتر و سریع‌تر مدل می‌کند) با استفاده از رابطه ۶ انجام شد (رن و همکاران ۲۰۲۳).

$$X_n = \frac{(X) - X_{\min}}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (6)$$

X: داده مشاهده‌شده، X_{\max} و X_{\min} : به‌ترتیب کمترین و بیشترین اندازه داده‌های مشاهده‌شده و X_n : داده بهنجار شده است.

سپس، آموزش شبکه انجام شد. برای رسیدن به ساختار مناسب شبکه عصبی مصنوعی، مدل‌های گوناگون با تعداد لایه مخفی و تعداد گره‌های متفاوت طراحی و آزمون شد و نتایج به‌دست آمده مقایسه شدند. در این راستا، در این پژوهش از مدل‌ها به‌شرح زیر استفاده شد.

۲- شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLPs)^۱

یک نوع شبکه عصبی پیش‌خور مدرن است که از نرون‌های کاملاً متصل با تابع فعال‌سازی غیرخطی تشکیل شده است و حداقل از سه لایه یا بیشتر (یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک یا چند لایه پنهان) از نرون‌های فعال‌شونده غیرخطی تشکیل شده است (نیها و همکاران ۲۰۲۳). یادگیری در این شبکه‌ها با تنظیم وزن اتصالات میان نرون‌ها انجام می‌شود. پس از پردازش هر داده، اندازه خطا میان خروجی شبکه و نتیجه مطلوب محاسبه می‌شود و وزن اتصالات بر اساس

4- Self-organizing feature maps (SOFMs)

5- Co-Active Neuro-Fuzzy Inference System (CANFIS)

1- Multilayer perceptions (MLPs)

2- Generalized feed forward (GFF)

3- Radial basis function (RBF)

ضریب کارایی (ME) و میانگین درصد خطای نسبی (RME) ارزیابی شد و بهترین روش برای پیش‌بینی رسوبات معلق در ایستگاه نارون افجه تعیین شد.

۱- ضریب تبیین (R^2)

این ضریب نسبت پراکنش متغیر وابسته پیرامون میانگین که با متغیرهای پیش‌بینی‌کننده مستقل بیان می‌شود، است.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_{obs} - \bar{O})(S_{sim} - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_{obs} - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_{sim} - \bar{S})^2}} \right]^2 \quad (7)$$

O_{obs} : داده مشاهده‌ای، \bar{O} : میانگین داده‌های مشاهده-ای، S_{sim} : داده شبیه‌سازی‌شده، \bar{S} : میانگین داده‌های مشاهده‌ای و n : تعداد داده‌ها است (بری و ایکسی ۱۹۹۳؛ کراس و همکاران ۲۰۰۵؛ گورپال و همکاران ۲۰۰۸). هر چه اندازه آن به ۱ نزدیک‌تر باشد معادله وایازی به‌دست‌آمده بهتر می‌توان روابط میان دو سنجه مدنظر را بیان کرد (بری و ایکسی ۱۹۹۳؛ کراس و همکاران ۲۰۰۵).

۲- ضریب کارایی (ME)

این نمایه را ناش و ساتکلیف در سال ۱۹۷۰ ارائه دادند. اندازه‌های به‌دست آمده از آن بدون بعد است و میان عدد ۱ تا منفی بی‌نهایت متغیر است. هر چه اندازه شاخص به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، هماهنگی میان دو گروه بیش‌تر است. در این پژوهش ضریب کارایی با استفاده از رابطه ۸ محاسبه شد.

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_{sim} - O_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (O_{obs} - \bar{O}_{obs})^2} \quad (8)$$

O_{obs} : داده مشاهده‌ای، \bar{O} : میانگین داده‌های مشاهده-ای، S_{sim} : داده شبیه‌سازی‌شده، \bar{S} : میانگین داده‌های مشاهده‌ای و n : تعداد داده‌ها است (ناش و ساتکلیف ۱۹۷۰). عدد صفر برای ضریب نامبرده بیانگر آن است که برآورد مدل بیش‌تر در محدوده میانگین مشاهده‌ها است. شکل این کسر بیانگر صحت و مخرج آن بیانگر دقت آن است (گورپال و همکاران ۲۰۰۸).

لایه اتصال فازی و لایه خروجی برای افزایش کارایی استفاده کرد. در این شبکه توابع عضویت نورون‌های فازی در طول مرحله آموزش با انتشار معکوس تنظیم می‌شوند و سیناپس‌های فازی در توصیف ورودی‌هایی که به‌راحتی قابل تشخیص نیستند، مؤثر هستند. از این شبکه‌ها برای مدل‌سازی سنجه‌های آب‌شناختی مانند نوسانات سطح آب زیرزمینی و افت آن، طبقه‌بندی کیفیت آب آشامیدنی، پیش‌بینی خشک‌سالی از نظر شدت و مدت، شبیه‌سازی ورودی آبگیر سد و ... استفاده می‌شود. عملکرد این شبکه به‌دلیل ترکیب قدرت شبکه‌های عصبی و منطق فازی، در مدل‌سازی سنجه‌های پیچیده آب‌شناختی مانند نوسانات سطح آب زیرزمینی و افت آن، خوب است (زارع و بیات ۲۰۱۳).

۷- شبکه عصبی (SVM)

یک دستورالعمل یادگیری ماشین نظارت‌شده برای طبقه‌بندی داده‌ها است که با یافتن یک خط یا فضای جداکننده بهینه، می‌توان داده‌ها را به دو طبقه جدا تقسیم کرد. از SVM به‌دلیل کارا بودن در مسائل خطی و غیرخطی در طیف گسترده‌ای از کاربردها شامل طبقه‌بندی داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌سازی سنجه‌های منابع آب و فرسایش و رسوب استفاده می‌شود (کرمی و همکاران ۲۰۲۰).

۸- مدل ترکیبی منحنی سنجه و شبکه عصبی

مصنوعی

در این روش‌ها با ترکیب منحنی‌های سنجه رسوب و شبکه عصبی مصنوعی، می‌توان دقت پیش‌بینی‌ها را بهبود بخشید. در این پژوهش در روش ترکیبی ۱، خروجی منحنی‌های سنجه به‌عنوان ورودی شبکه عصبی استفاده شد تا دقت پیش‌بینی‌ها افزایش یابد. در روش ترکیبی ۲، خروجی‌های هر دو مدل به‌شکل هم‌زمان استفاده ترکیب شدند تا نتایج بهتری به‌دست آید (خزایی پول و طالبی ۲۰۱۴).

ارزیابی دقت و کارایی هر یک از روش‌ها

سرانجام، دقت و کارایی هر یک از این روش‌ها با استفاده از معیارهای گوناگون آماری مانند ضریب تبیین (R^2),

نتایج و بحث

در این پژوهش، پیش‌بینی رسوبات معلق در ایستگاه نارون (افجه) با استفاده از مدل ترکیبی منحنی سنجۀ رسوب و شبکه عصبی مصنوعی بررسی شد. پس از برآورد معادلات منحنی سنجۀ رسوب، بر اساس مدل‌های گوناگون و با استفاده از ۲۲۲ داده متناظر آبردهی جریان و آبردهی رسوب، نتایج به‌دست آمده از رسم منحنی‌های سنجۀ رسوب با روش‌های گوناگون در جدول ۲ آورده شده است. نتایج نشان داد بهترین و ضعیف‌ترین برآورد از رسوب معلق به ترتیب مربوط به روش میانگین دسته‌ها با R^2 برابر ۰/۸۴ و روش دوخطی با R^2 برابر ۰/۵۳ بود. این یافته بیانگر دقت بیشتر روش میانگین دسته‌ها در مقایسه با دیگر روش‌ها است.

۳- میانگین درصد خطای نسبی (RME)

میانگین درصد خطای نسبی (RME) یک معیار برای اندازه‌گیری دقت یا نبودن دقت یک مدل پیش‌بینی‌کننده است. هر چه اندازه این معیار آماری کمتر باشد، بیانگر آن است که دقت معادله‌های مربوطه بیشتر است. معمولاً از این شاخص، در پیش‌بینی و برآورد معادله‌های وایزی استفاده می‌شود.

$$RME = \sum_{i=1}^n \frac{RE_i}{n} \quad (9)$$

$$RE_i = \left| \frac{S_o^n - S_c}{S_o} \right| * 100 \quad (10)$$

RME: میانگین درصد خطای نسبی، RE_i : درصد خطای نسبی هر برآورد، S_o : اندازه رسوب معلق مشاهده شده، S_c : اندازه رسوب معلق برآورد شده و n : تعداد دفعات اندازه‌های برآورد شده رسوب معلق است.

جدول ۲- نتایج رسم منحنی‌های سنجۀ رسوب با روش‌های گوناگون (a: ضریب شیب، b: ثابت معادله منحنی سنجۀ رسوب).

Table 2- Results of sediment rating curve development using different methods (a: Slope factor, b: Constant equation of sediment rating curve).

R^2	b	a	Sediment Rating Curve Method
0.72	1.49	5.66	Linear
0.70	1.53	6.07	Qw<1m3/s
0.53	0.46	6.53	Qw>1m3/s
<u>0.84</u>	<u>1.36</u>	<u>6.34</u>	<u>Midpoint of Class Intervals</u>
0.72	1.49	6.77	FAO Correction Factor
0.72	1.49	6.23	Parametric Correction Factor
0.72	1.49	8.56	Nonparametric Correction Factor

شد. نتایج این پژوهش نشان داد که روش میانگین دسته‌ها در مقایسه با دیگر روش‌ها برتری داشت و با استفاده از این روش می‌توان اندازه رسوبات معلق را با دقت زیادی پیش‌بینی کرد. سپس، روش میانگین دسته‌ها به‌عنوان بهترین روش برای رسم منحنی سنجۀ رسوب و به‌عنوان روش مبنا، تعیین شد و اندازه رسوب برآوردی هر روش با مقایسه با روش نامبرده تعیین شد. در این پژوهش، به‌منظور بررسی صحت و دقت هر یک

بر پایه نتایج جدول ۳، در تمام شاخص‌های ارزیابی، بهترین عملکرد منحنی سنجۀ رسوب مربوط به روش میانگین دسته‌ها بود. این روش با داشتن کمترین اندازه میانگین درصد خطای نسبی (RME) و بیشترین اندازه ضریب کارایی (ME) و ضریب تبیین (R^2)، به‌عنوان دقیق‌ترین روش برای پیش‌بینی رسوبات معلق شناخته شد. از این رو، این مدل به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای برآورد رسوبات معلق در ایستگاه نارون (افجه) انتخاب

معیارهای گوناگون در جدول ۳ نشان داده شده است. با بررسی نتایج این ارزیابی‌ها بهترین روش برای پیش‌بینی رسوبات معلق در ایستگاه نارون (افجه) تعیین شد و مشخص شد که کدام روش بیشترین دقت را دارد.

از روش‌های استفاده‌شده برای پیش‌بینی رسوبات معلق و انتخاب مناسب‌ترین مدل منحنی سنجه از معیارهای گوناگونی استفاده شد و سپس دقت پیش‌بینی هر روش ارزیابی شد. نتایج ارزیابی هر یک از این روش‌ها با

جدول ۳- نتایج ارزیابی هر کدام از روش‌ها با معیارهای گوناگون.

Table 3- Evaluation of each method based on different criteria.

Coefficient of Determination (R2)	Efficiency Coefficient (ME)	Relative Mean Error (RME)	Sediment Rating Curve Method
0.72	0.09	181.49	Linear
0.67	0.61	177.91	Bilinear
0.84	<u>0.82</u>	<u>211.87</u>	<u>Midpoint of Class Intervals</u>
0.71	0.63	1675.44	FAO Correction Factor
0.73	0.14	204.93	Parametric Correction Factor
0.72	0.71	795.43	Nonparametric Correction Factor

برآورد کمتری از اندازه رسوب معلق داشتند، درحالی‌که دیگر روش‌ها برآورد بیشتری داشتند. انتخاب روش مناسب بستگی به دقت لازم و شرایط خاص منطقه دارد، اما با توجه به نتایج ارزیابی، بهترین دقت پیش‌بینی رسوبات معلق مربوط به روش میانگین دسته‌ها بود

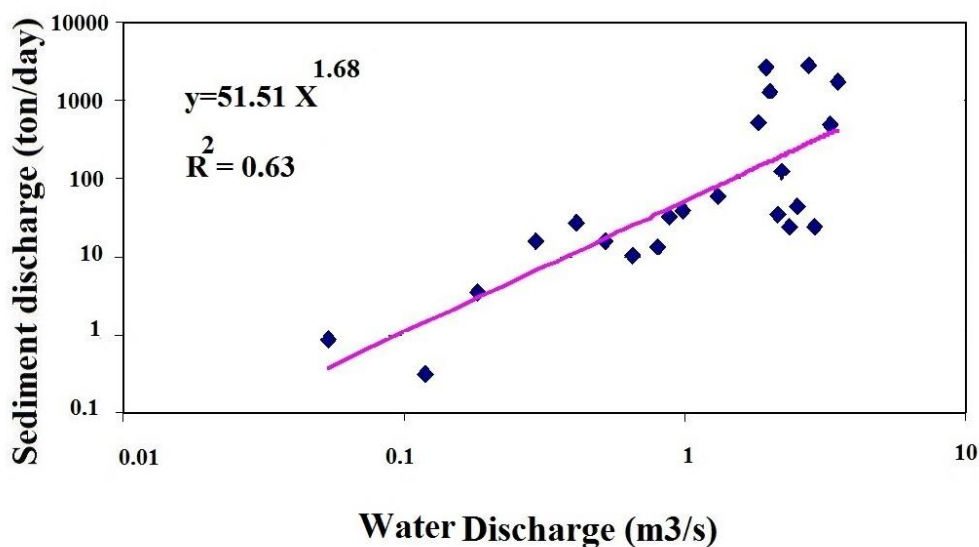
نمودار منحنی سنجه رسوب با روش میانگین دسته‌ها برای ایستگاه نارون (افجه) در شکل ۲ ارائه شده است. این نمودار بیانگر رابطه میان آب‌دهی جریان و آب‌دهی رسوب در این ایستگاه است. از این رو، بر اساس ارزیابی‌های انجام‌شده روش میانگین دسته‌ها به‌عنوان بهترین روش پیش‌بینی رسوبات معلق با دقت زیاد تعیین شد که می‌توان به‌عنوان مرجع اصلی در تحلیل‌ها و مدیریت منابع آب منطقه از آن بهره برد.

نتایج مقایسه روش‌های یک‌خطی، دوخطی، ضریب اصلاحی فائو، ضریب اصلاحی سنجه‌ای و ضریب اصلاحی غیر سنجه‌ای با روش مبنا در جدول ۴ ارائه شده است. بر پایه این نتایج، کمترین اندازه برآورد مربوط به روش یک‌خطی با اندازه رسوب برآوردی ۰/۳۴٪ و روش ضریب اصلاحی سنجه‌ای با اندازه رسوب برآوردی ۰/۳۸٪، در مقایسه با روش میانگین دسته‌ها بود. از سوی دیگر، بیشترین اندازه برآورد مربوط به روش دوخطی با اندازه رسوب برآوردی ۱/۹۳٪، روش ضریب اصلاحی فائو با اندازه رسوب برآوردی ۲/۵۹٪، و روش ضریب اصلاحی غیر سنجه‌ای با اندازه رسوب برآوردی ۱/۲۱٪، در مقایسه با روش مبنا بود. این یافته‌ها بیانگر آن است که روش‌های یک‌خطی و ضریب اصلاحی سنجه‌ای، در مقایسه با روش میانگین دسته‌ها،

جدول ۴- اندازه رسوب برآوردی هر روش در مقایسه با روش مبنا (روش میانگین دسته‌ها).

Table 4- Estimated sediment load of each method relative to the reference method (median class method).

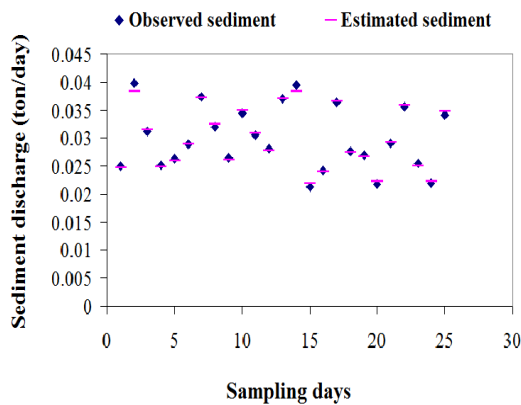
Nonparametric Correction Factor	Parametric Correction Factor	FAO Correction Factor	Bilinear	Linear
1.21	0.38	2.59	1.93	0.34



شکل ۲- نمودار سنجه رسوب با روش میانگین دسته‌ها در ایستگاه نارون (افجه).
 Figure 2- Sediment rating curve using the median class method at Narun (Afjeh) Station.

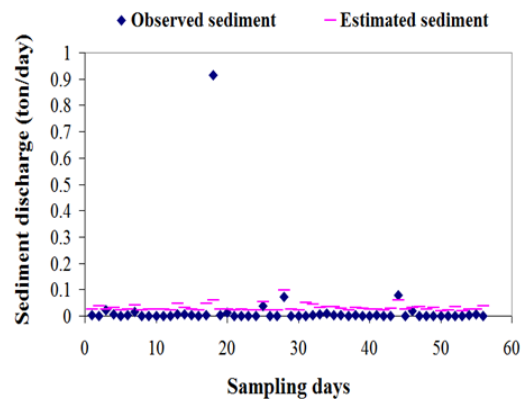
رسوب مشاهده شده بودند. این یافته یکی از نقاط ضعف عملکرد شبکه‌های عصبی در برآورد آب‌دهی رسوبات معلق بود. از سوی دیگر، اندازه رسوب برآورد شده به وسیله شبکه‌های عصبی مصنوعی با استفاده از روش‌های GFF، RBF و CANFIS به‌طور قابل‌توجهی نزدیک به اندازه‌های رسوب اندازه‌گیری شده در آب‌دهی‌های پایه و بهنجار در ایستگاه مطالعه شده بود.

نتایج اندازه‌های رسوب مشاهده شده و برآورد شده به وسیله مدل‌های گوناگون شبکه‌های عصبی مصنوعی در ایستگاه نارون (افجه) در شکل‌های ۳ تا ۸ نشان داده شده است. بر پایه شکل ۳، اندازه رسوب برآورد شده به وسیله شبکه‌های عصبی مصنوعی با استفاده از روش‌های MLPs و SOFMs در نقاط اوج اصلی به‌طور چشمگیری کمتر از اندازه‌های مشاهده شده بود، در حالی که در آب‌دهی‌های پایه، این اندازه‌ها بیشتر از



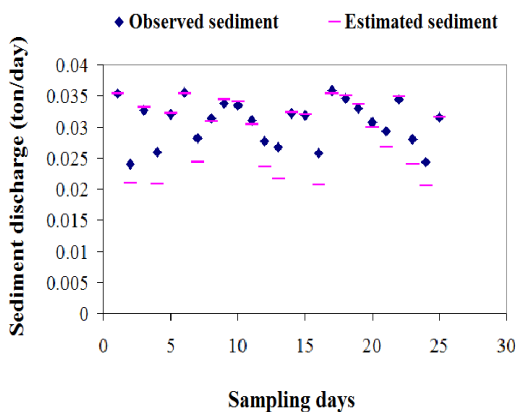
شکل ۴- نمودار اندازه‌های رسوب مشاهده‌ای و برآوردشده به وسیله شبکه عصبی مصنوعی (GFF) در ایستگاه نارون (افجه).

Figure 4- Observed and estimated sediment load using artificial neural networks (GFF) at Narun (Afjeh) Station.



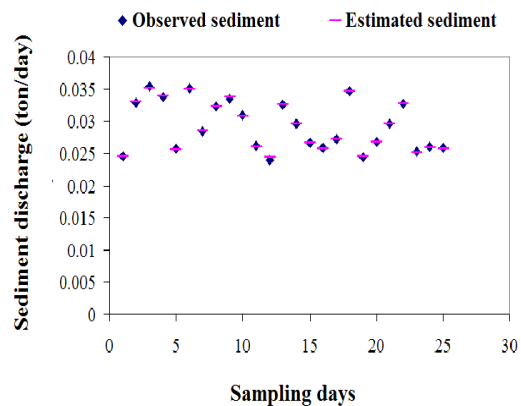
شکل ۳- نمودار اندازه‌های رسوب مشاهده‌ای و برآوردشده به وسیله شبکه عصبی مصنوعی (MLPs) در ایستگاه نارون (افجه).

Figure 3- Observed and estimated sediment load using artificial neural networks (MLPs) at Narun (Afjeh) Station.



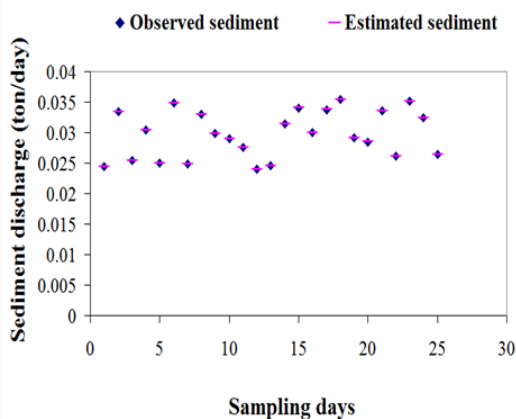
شکل ۶- نمودار اندازه‌های رسوب مشاهده‌ای و برآورد شده به وسیله شبکه عصبی مصنوعی (SVM) در ایستگاه نارون (افجه).

Figure 6- Observed and estimated sediment load using artificial neural networks (SVM) at Narun (Afjeh) Station.



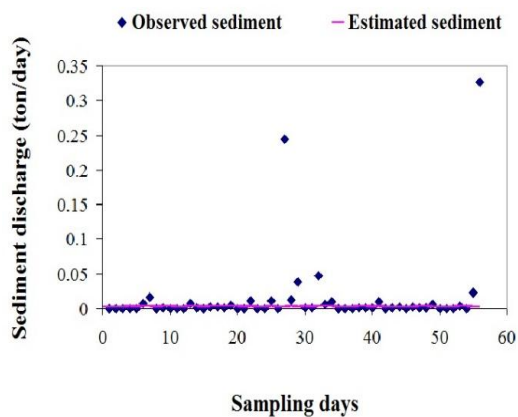
شکل ۵- نمودار اندازه‌های رسوب مشاهده‌ای و برآوردشده به وسیله شبکه عصبی مصنوعی (RBF) در ایستگاه نارون (افجه).

Figure 5- Observed and estimated sediment load using artificial neural networks (RBF) at Narun (Afjeh) Station.



شکل ۸- نمودار اندازه‌های رسوب مشاهده‌ای و برآوردشده به‌وسیله شبکه عصبی مصنوعی (CANFIS) در ایستگاه نارون (افجه).

Figure 8- Observed and estimated sediment load using artificial neural networks (CANFIS) at Narun (Afjeh) Station.



شکل ۷- نمودار اندازه‌های رسوب مشاهده‌ای و برآوردشده به‌وسیله شبکه عصبی مصنوعی (SOFMs) در ایستگاه نارون (افجه).

Figure 7- Observed and estimated sediment load using artificial neural networks (SOFMs) at Narun (Afjeh) Station

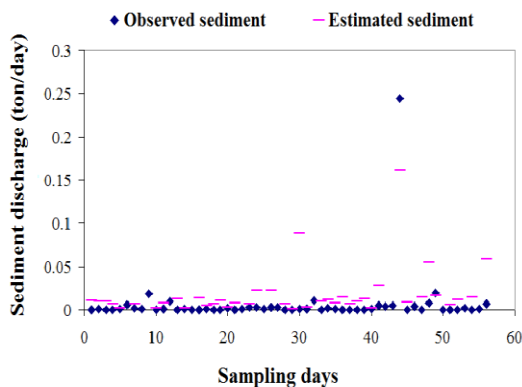
بود و می‌توان روش نامبرده را به‌عنوان روش ترجیحی برای استفاده در آبخیز مطالعه‌شده توصیه کرد. به‌منظور بهبود نتایج پیش‌بینی‌ها از مدل‌های ترکیبی ۱ و ۲ استفاده شد که نتایج آن‌ها در شکل‌های ۹ و ۱۰ در ایستگاه نارون (افجه) ارائه شده است.

بر پایه نتایج ارزیابی ارائه‌شده در جدول ۵، روش CANFIS با بیشترین ضریب کارایی (۰/۸۱۲۳) در مقایسه با دیگر روش‌ها، به‌عنوان بهترین روش تعیین شد. این یافته بیانگر عملکرد بهتر روش CANFIS در برآورد آبدهی رسوبات معلق در ایستگاه نارون (افجه)

جدول ۵- نتایج ارزیابی هرکدام از روش‌ها با معیارهای گوناگون.

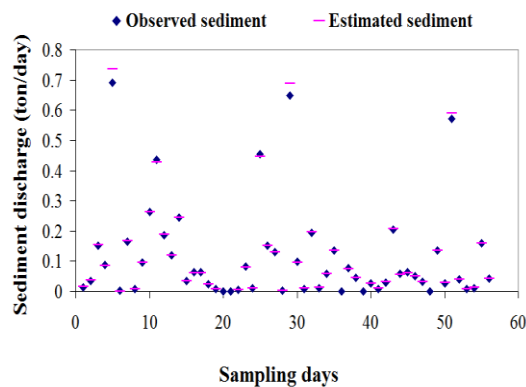
Table 5- Evaluation results of each method using different criteria.

SOFMs	Artificial Neural Network (ANN) Method					Learning Rule of Neural Networks
	CANFIS	SVM	RBF	GFF	MLPs	
4357.89	<u>248.72</u>	93.22	379.89	141.09	31838.68	Relative Mean Error (RME)
-0.1320	<u>0.8123</u>	0.1798	0.1987	0.213	0.649	Efficiency Coefficient (ME)



شکل ۱۰- نمودار اندازه‌های رسوب مشاهده‌ای و برآوردشده به وسیله مدل ترکیبی ۲ در ایستگاه نارون (افجه).

Figure 10- Observed and estimated sediment load using ensemble model 2 at Narun (Afjeh) Station.



شکل ۹- نمودار اندازه‌های رسوب مشاهده‌ای و برآوردشده به وسیله مدل ترکیبی ۱ در ایستگاه نارون (افجه).

Figure 9- Observed and estimated sediment load using ensemble model 1 at Narun (Afjeh) Station.

هر یک از روش‌های ترکیبی با معیارهای گوناگون در جدول ۵، ارائه شده است. به‌طور ویژه، بهترین عملکرد در شبیه‌سازی آبدهی رسوب معلق مربوط به مدل ترکیبی ۱ با میانگین درصد خطای نسبی (RME) ۵۹/۶۳ و ضریب کارایی (ME) ۰/۸۷۶۱ بود.

بر پایه شکل ۹ و ۱۰ مشخص شد که مدل ترکیبی ۱ هم اندازه‌های آبدهی‌های اوج و هم اندازه‌های آبدهی‌های پایه را بسیار دقیق برآورد کرد، درحالی‌که عملکرد مدل ترکیبی ۲ در برآورد آبدهی‌های پایه و به‌ویژه آبدهی‌های اوج بسیار ضعیف بود. نتایج ارزیابی

جدول ۵- نتایج ارزیابی هر کدام از روش‌ها با معیارهای گوناگون.

Table 5- Evaluation results of each method using different criteria.

Hybrid Model 2	Hybrid Model 1	Hybrid Model Type
8684.34	<u>59.63</u>	Relative Mean Error (RME)
0.5759	<u>0.8761</u>	Efficiency Coefficient (ME)

ترکیبی ۱ دقت پیش‌بینی‌ها را به‌طور قابل‌توجهی بهبود داد به‌شکلی که داده‌های برآوردشده با داده‌های مشاهده‌شده تناسب بهتری داشته باشند. این نتایج می‌توانند به پژوهشگران و متخصصان در انتخاب و استفاده از بهترین روش برای برآورد بار رسوب معلق در مناطق مختلف کمک کنند و در نتیجه، دقت و صحت پیش‌بینی‌ها و شبیه‌سازی‌ها را بهبود بخشند.

نتایج کامل ارزیابی هر یک از روش‌ها با استفاده از معیارهای گوناگون برای انتخاب بهترین روش میان روش‌های معرفی‌شده، در جدول ۶، جمع‌بندی شده است. بر اساس نتایج این پژوهش مدل ترکیبی ۱، با میانگین درصد خطای نسبی (RME) ۵۹/۶۳ و ضریب کارایی ۰/۸۷۶۱ (ME) به‌عنوان بهترین روش در شبیه‌سازی آبدهی رسوب معلق شناخته شد. این یافته‌ها بیانگر آن است که می‌توان با استفاده از مدل

جدول ۶- نتایج ارزیابی هر کدام از روش‌ها با معیارهای گوناگون.

Table 6- Evaluation results of each method using different criteria.

Efficiency Coefficient (ME)	Relative Mean Error (RME)	Method
0.813	211.87	Sediment Rating Curve
0.8123	248.72	CANFIS
<u>0.8761</u>	<u>59.63</u>	<u>Hybrid Model 1</u>
0.5759	8684.34	Hybrid Model 2

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بیشترین ضریب کارایی (۰/۸۱۲۳) به‌عنوان بهترین روش پیشنهاد شد. در این پژوهش نتایج بررسی استفاده از شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که این مدل‌ها نقاط اوج را به‌طور قابل توجهی کمتر از اندازه‌های مشاهده‌ای برآورد کردند، که این یافته یکی از ضعف‌های شبکه‌های عصبی در برآورد رسوبات معلق به‌شمار می‌آید. با این‌حال، عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی رسوبات معلق مربوط به آب‌دهی‌های پایه و بهنجار خوب بود، اما در شبیه‌سازی رسوبات در زمان‌های سیلابی نامناسب بود.

نتایج استفاده از مدل‌های ترکیبی نشان داد که کمترین میانگین درصد خطای نسبی (۵۹/۶۳) و بیشترین ضریب کارایی (۰/۸۷۶۱)، در میان ۱۴ روش استفاده‌شده در این پژوهش مربوط به مدل ترکیبی ۱ بود که در آن قابلیت‌های دو روش اولیه ترکیب شده بود و از این‌رو به‌عنوان بهترین روش برای برآورد رسوب معلق شناخته شد. در این مدل، یک ساختار عصبی مصنوعی با استفاده از نتایج منحنی سنجه برتر (روش میانگین دسته‌ها) ساخته شد تا با استفاده بهترین روش شبکه عصبی مصنوعی (CANFIS) اندازه بار معلق برآورد شود. این نتایج بیانگر آن است که روش ترکیبی با بیشترین دقت در پیش‌بینی رسوبات معلق در مقایسه با استفاده از دیگر روش‌ها مناسب بود و با استفاده از مدل‌های ترکیبی مانند منحنی سنجه رسوب و شبکه عصبی مصنوعی می‌توان دقت پیش‌بینی رسوبات معلق را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشید. این مدل‌ها با ترکیب داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده، امکان ارائه برآوردهای دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تر از اندازه رسوبات معلق در ایستگاه‌های آب‌سنجی را فراهم می‌کنند. نتایج این پژوهش با یافته‌های ونگ و همکاران

نتایج به‌دست‌آمده از رسم روش‌های گوناگون منحنی سنجه رسوب، نشان داد که کمترین اندازه میانگین خطای نسبی (۲۱۱/۸۷) و بیشترین ضریب کارایی (۰/۸۲) مربوط به روش منحنی سنجه رسوب میانگین دسته‌ها بود و در مقایسه با دیگر روش‌های منحنی سنجه رسوب، بهترین نتایج پیش‌بینی را ارائه داد. از این‌رو، این مدل به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای برآورد رسوب معلق با استفاده از روش منحنی سنجه رسوب انتخاب شد. به دو دلیل مهم با این روش بهترین برآورد در پیش‌بینی رسوب معلق انجام شد. اولاً، این روش بر مبنای توزیع داده‌های رسوب معلق استوار است و به توزیع داده‌های باینری یا رسوبات متوسط وابسته نیست. یعنی با این روش می‌توان اندازه رسوب معلق را در تمام دامنه اندازه‌های ممکن پیش‌بینی کرد. دوماً، در روش منحنی میانگین دسته‌ها هم از ترکیب دقت و هم از انعطاف‌پذیری می‌توان بهره برد. در این روش با استفاده از تعداد کمی از دسته‌ها و انتخاب نقاط میانی آن‌ها، می‌توان پیش‌بینی اندازه رسوب معلق را در مقایسه با دیگر روش‌ها با دقت بیشتری انجام داد. با استفاده از روش نامبرده، می‌توان تناسب منحنی را با داده‌های واقعی تطبیق داد و برآوردی دقیق و قابل اعتماد ارائه کرد. از این‌رو، روش منحنی میانگین دسته‌ها به‌عنوان یک روش مؤثر و قابل اعتماد و ابزاری قدرتمند برای پیش‌بینی اندازه رسوب معلق در اختیار پژوهشگران و متخصصان در زمینه مدیریت و مهار رسوبات معلق است. نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های ایرانی و همکاران (۲۰۱۹)، بالول و همکاران (۲۰۲۳) مبنی بر دقت روش میانگین دسته‌ها تطابق دارد.

بر اساس نتایج ارزیابی هر یک از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی با معیارهای گوناگون، روش CANFIS با

نتایج این پژوهش نشان داد می‌توان با استفاده از مدل‌های ترکیبی دقت پیش‌بینی رسوبات معلق را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد و از آن به‌عنوان ابزاری مؤثر برای مدیریت و پیش‌بینی رسوبات معلق و بهبود مدیریت منابع آب استفاده کرد. همچنین، پیشنهاد می‌شود مهندسان و مدیران منابع آب از نتایج این پژوهش برای توسعه راهکارهای بهینه برای مدیریت رسوبات معلق، بهره ببرند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسنده مسئول این مقاله اعلام می‌دارد که هیچ‌گونه تضاد منافی در زمینه نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

تمام بخش‌های مقاله به‌وسیله نویسنده مسئول انجام شده است.

(۲۰۲۲)، ژنگ (۲۰۲۳)، مرادی‌نژاد و همکاران (۲۰۲۳) و بسطامی و فاتح (۲۰۲۴) مبنی بر قابلیت بالای شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی رسوبات، لی و همکاران (۲۰۲۱) در زمینه توانایی زیاد ترکیب مدل‌های منحنی سنجه رسوب و شبکه عصبی برای پیش‌بینی رسوبات معلق رود همخوانی دارد. همچنین، نتایج این پژوهش با یافته‌های کومار و همکاران (۲۰۲۱)، لی و همکاران (۲۰۱۹) و مردوخ‌پور و همکاران (۲۰۱۹) مبنی بر استفاده از مدل‌های ترکیبی برای پیش‌بینی رسوبات معلق در مقایسه با استفاده از مدل‌های جداگانه هم‌راستا است. بر اساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده از مدل‌های ترکیبی برای پیش‌بینی رسوبات معلق استفاده شود. همچنین، توسعه و بهبود روش‌های ترکیبی می‌تواند سبب افزایش دقت و کارایی این مدل‌ها شود. استفاده از داده‌های بیشتر و متنوع‌تر نیز می‌تواند سبب بهبود نتایج شود و دقت پیش‌بینی را افزایش دهد. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود برای توسعه و بهینه‌سازی روش‌های ترکیبی، در ایستگاه‌های آب‌سنجی به‌ویژه در آب‌دهی‌های زیاد و شرایط سیلابی، از امکانات پیشرفته نمونه‌گیری و تعداد نمونه‌های بیشتر استفاده شود.

فهرست منابع

- Aytek A, Ozgur K. 2008. A genetic programming approach to suspended sediment modelling. *Journal of Hydrology*. 351(3-4): 288-298. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.005>
- Baloul D, Nekkach A, Ghenim A, Megnounin A. 2023. Estimation of sediment concentration using sediment rating curve approach in Isser Watershed (North-West of Algeria). *Ecological Engineering and Environmental Technology*. 24(6): 282-291. <https://doi.org/10.12912/27197050/169308>
- Bestami T, Fatih Ü, Demirci M, Güzel, H. 2024. Suspended sediment estimation using Machine Learning Methods. (In Persian). https://doi.org/10.24193/awc2024_10
- Bray I, Xie H. 1993. A regression method for estimating Suspended sediment yield for engaged watersheds in Atlantic Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 20(2): 82-87. <https://doi.org/10.1139/193-009>
- Chen L, Chau K. 2006. Intelligent manipulation and calibration of parameters for hydrological models. *International Journal of Environment and Pollution*. 28(3-4): 432-447. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2006.011221>
- Christian W, Dawson R, Wilby L. 1998. An artificial neural network approach to rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*. 43(1): 47-66. <https://doi.org/10.1080/02626669809492102>
- Cigizoglu H. 2005. Application of artificial neural networks to suspended sediment forecasting. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 29(1): 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.09.009>
- George C. 1989. Approximation by superposition of a sigmoidal function. *Mathematics of Control, Signals, and Systems*.

- 2(4): 303-314.
<https://doi.org/10.1007/BF02551274>
- Gurpal S, Harmel D, Haggard B, Schmidt G. 2008. Evaluation of regression methodology with low-frequency water quality sampling to estimate constituent loads for ephemeral watersheds in Texas. *Journal of Environmental Quality*. 37(5): 1847-1854.
<https://doi.org/10.2134/jeq2007.0232>
- Hien T, Le T. 2023. Estimation of daily suspended sediment concentration in the Ca River Basin using a sediment rating curve, multiple regression, and long short-term memory model. *Journal of Water and Climate Change*.
<https://doi.org/10.2166/wcc.2023.229>
- Iadanza C, Napolitano F. 2006. Sediment transport time series in the Tiber River. *Physics and Chemistry of the Earth*. 31(10-17): 1212-1227.
- Irani T, Nazari Nejad H, Najafzadeh A. 2019. Estimation of suspended sediment load using rating curve method (Case study: Qareh Su Watershed). *Proceedings of the Fourteenth National Conference on Watershed Science and Engineering of Iran*. (In Persian).
- Karami F, Bayati Khatibi M, Kheirizadeh M, Mokhtari Asl A. 2020. Evaluation of performance of support vector machine algorithm in landslide susceptibility zoning in Ahar-chai Basin. *Journal of Geography and Environmental Hazards*. 8(4): 1-17. (In Persian).
- Khezayi Pool A, Talebi A. 2013. Investigating the possibility of predicting suspended sediments using a combination of sediment rating curve and artificial neural network (Case study: Ghatourchai River, Yazdkan Bridge). *Environmental Erosion Research*. 3(9): 73-82. (In Persian).
- Krause P, Boyle D, Base F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model Assessment. *Advances in Geosciences*. 5: 89-97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>.
- Kumar S, Girija C, Nag V. 2021. Prediction and forecasting of daily suspended sediment concentration using M5Tree, ANN and LSSVM models: a case study of river Cauvery, India. *Applied Water Science*. 11(1): 231-237.
<https://doi.org/10.1007/s11356-017-0405-4>.
- Kurt H, Maxwell B, Stinchcombe H. 1989. Multilayer feedforward networks are universal approximates. *Neural Networks*. 2(5): 359-366.
[https://doi.org/10.1016/0893-6080\(89\)90020-8](https://doi.org/10.1016/0893-6080(89)90020-8)
- Lee B, Yun T, Choi K, Choi J, Jeong C. 2019. Hybrid Sediment Rating Curve Model for Suspended Sediment Prediction. *Water*. 11(2):213-221.
<https://doi.org/10.3390/w11020213>
- Lee H, Yoon Y, Cho S, Choi J. 2021. Suspended sediment prediction using an integrated model of rating curve and artificial neural network for the Han River, Korea. *Water*. 13(4): 472-482.
<https://doi.org/10.3390/w13040472>
- Mardookhpour A, Jamasi H, Alipour O. 2019. Sediment load estimation using rating curve method and comparison with regression and artificial neural network methods (Case study: Babol River, Mazandaran Province). *Journal of Environmental Science and Technology*. 21(11): 79-91. (In Persian).
- Moradi Nejad A, Davod Moghaddam D, Moradi M. 2023. Evaluation of methods for estimating suspended sediment load of Qareh Chai River. *Environment and Water Engineering*. 5(4): 328-338.
- Mustapha S, Adda D, Yebdri D, Baghdadi S, Gajbhiye M. 2024. Artificial neural network for modelling the sediments accumulation in Es-Saada reservoir (North-Western Algeria). *International Journal of Hydrology Science and Technology*.
<https://doi.org/10.1504/ijhst.2024.135122>
- Nash J, Sutcliffe J. 1970. River flow forecasting through conceptual models I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10(1): 282-290.
- Niha K, Basha S, Bhatia K, Abhishek K, Arwa M. 2023. *Multilayer Perceptron*. In *Artificial Intelligence and Machine Learning for Engineers*. Wiley. pp. 67-87.
<https://doi.org/10.1002/9781394167791.ch4>
- Peyravan H, Shariat Jafari M, Lotfollazadeh D. 2017. The impact of landslides on sediment load of Jajroud River. *Watershed Engineering and Management*. 9(2): 179-189. (In Persian).



Predicting Suspended Sediment using a Hybrid Model of Sediment Rating Curve and Artificial Neural Network in the Naroun Afjeh Station

Golaleh Ghaffari 

Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Kermanshah, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

The concentration of suspended sediments is one of the most important water quality indicators in surface water resources and a significant hydrological phenomenon. However, traditional methods, such as sediment rating curves (SRCs), lack accuracy due to not considering all effective parameters. In this context, hybrid models that include SRCs and artificial neural networks (ANNs) have emerged as a promising approach for enhancing SSC prediction accuracy. These models, with their ability to use complex nonlinear patterns, outperform traditional methods. This study aims to develop and implement an SRC-ANN hybrid model for SSC prediction. The proposed model is predicted to significantly improve prediction accuracy by combining the strengths of both methods, aiding in optimal water resource management and the proper functioning of hydraulic structures.

Materials and Methods

This research introduces a novel hybrid model that integrates sediment rating curves (SRCs) and artificial neural networks (ANNs) was used for a more accuracy prediction of suspended sediment in the Naroun (Afejeh) hydrometric station. For this purpose, data from 222 sample of flow discharge and suspended sediment over a 50-years period (1971 to 2021) were used. Additionally, 14 different were employed, including 6 sediment rating curve methods, 6 artificial neural network methods and 2 hybrid methods, to simulate suspended sediment. The performance of each method was evaluated using statistical criteria such as coefficient of determination (R^2), efficiency coefficient (ME), and mean relative error percentage (RME).

Article Type: Research Article

***Corresponding Author E-mail:** g.ghaffari@areeo.ac.ir

Citation: Ghaffari, G. 2025. Predicting Suspended Sediment Using a Hybrid Model of Sediment Rating Curve and Artificial Neural Network in the Naroun Afjeh Station. *Watershed Management Research*. 38(1): 128-146.

DOI: 10.22092/wmrj.2024.366243.1589

Received: 08 July 2024, **Received in revised form:** 01 August 2024, **Accepted:** 19 September 2024

Published online: 21 March 2025

Watershed Management Research, Vol.38, No.1, Ser. No:146, Spring 2025, pp. 128-146.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center ©Author(s)



Results and discussion

The results showed that among the sediment rating curve methods, the most accurate simulation of the observed sediment discharge conditions compared to other methods was related to the midpoint method, with a coefficient of determination (R^2) of 0.840, a modeling efficiency (ME) of 0.820, and a mean relative error (RME) of 0.211%. Also, among the artificial neural network methods, the most accurate simulation was related to the CANFIS method, with a modeling efficiency (ME) of 0.8123 and a mean relative error (RME) of 0.248. Finally, to improve the prediction results, hybrid models 1 and 2 were used. The results showed that the best estimate of suspended sediment was related to hybrid method 1, with a modeling efficiency (ME) of 0.8761 and a mean relative error (RME) of 0.06359%.

In the mentioned method, both the estimation of peak flow discharge and the estimation of base flow discharge were very accurate, and it was introduced as the most accurate method for predicting suspended sediments. These results highlight the potential of using hybrid model 1 to significantly improve prediction accuracy and to better fit the observed data.

Conclusion and Suggestions

Among the sediment rating curve methods, the mean category sediment rating curve method was identified as the best approach for predicting suspended sediment due to its consideration of data distribution and flexibility. The performance of artificial neural networks (ANNs) in simulating sediment for base and normal flows was good, but were weaker in predicting sediment during flood events. The most accurate method for suspended sediment prediction is the Hybrid model 1, which use a MSM and ANN methods. Improper selection of a sediment prediction method can lead to inaccurate results. Also, it is essential to examine the impact of other variables beyond flow discharge on sediment. The results of this research showed that it is possible to significantly increase the accuracy of suspended sediment prediction using hybrid models, and that these models can be utilized as an effective tool for managing and predicting suspended sediments, as well as improving water resource management. It is recommended to use advanced sampling facilities and a larger number of samples at hydrometric stations, especially in high-flow and flood conditions, for the development and optimization of hybrid methods. Additionally, it is suggested that engineers and water resource managers utilize the findings of this research to develop optimal strategies for suspended sediment management.

Keywords: Discharge, Hydrometric station, Modeling, Sediment concentration, Simulation

Article Type: Research Article

Conflicts of interest:

The author declare that she has no conflicts of interest concerning the authorship or publication of this research.

Data Availability Statement:

The data and results used in this study will be made available upon reasonable request to the corresponding author.

Authors' Contribution

All parts of the article were written by the corresponding author.

نام‌های داورانی که در این شماره با نشریه همکاری کردند:
(به ترتیب حروف الفبا)

آقابیگی امین، سهیلا
پاک پرور، مجتبی
چوبین، بهرام
حقی آبی، امیر حمزه
خلیلی، داور
دستورانی، محمد تقی
زارع، محمد
سلیمان پور، سید مسعود
سیلاخوری، اسماعیل
شادفر، صمد
شیرانی، کورش
صالح، ایمان
صوفی، مجید
عرفانی فرد، سید یوسف
فرخزاده، بهنوش
کاویان، عطاالله
کریمی سنگچینی، ابراهیم
کله‌هوایی، مهین
مصطفی‌زاده، رئوف
مصفايي، جمال
نوروزی، علی اکبر
وکیلی تجره، فرزانه



مرکز تحقیقات، آموزش، پژوهش‌های آموزشی و منابع انسانی

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مرکز تحقیقات، آموزش، ترویج کشاورزی

شیوه‌نامه نگارش مقاله برای نشریه علمی پژوهش‌های آبخیزداری

عنوان مقاله (حداکثر ۲۰ کلمه با قلم بی- نازنین ۱۵ پرننگ و کلمات انگلیسی احتمالی در عنوان، با قلم Times New Roman 14 Bold)

نام و نام خانوادگی نگارنده اول*^۱، نام و نام خانوادگی نگارنده دوم^۲، ... (بی- نازنین ۱۱ پرننگ)

- ۱- مرتبه علمی نگارنده اول، نام گروه آموزشی، نام دانشکده، نام دانشگاه یا سازمان، نام شهر، نام کشور (قلم بی- نازنین ۱۱)
- ۲- مرتبه علمی نگارنده دوم، نام گروه آموزشی، نام دانشکده، نام دانشگاه یا سازمان، نام شهر، نام کشور (قلم بی- نازنین ۱۱)

نکته مهم: در مورد جایگاه (ترتیب) نویسندگان و همچنین سمت سازمانی نویسنده‌ها آن است که جایگاه و عنوان‌های نوشته شده در مقاله با جایگاه و عنوان‌هایی که نویسنده مسئول در تارنمای نشریه هنگام ثبت نام درج می‌کند، باید دقیقاً یکسان باشند.

درج کد آرکید همه نویسندگان که در تارنمای نشریه در هنگام ارسال مقاله دریافت شده است در دایره سبز کنار نام

نویسندگان، الزامی است. (روش وارد کردن کد آرکید: روی دایره نماد کد آرکید (دایره سبز رنگ) کلیک سمت راست کنید از کادر باز شده گزینه **Edit Hyperlink** را انتخاب کرده و مجدداً در کادر باز شده در بخش **Address** کد آرکید را برای هر نویسنده به جای اعداد صفر بنویسید و سپس گزینه **ok** را انتخاب کنید. در بخش انگلیسی هم این کد را در کنار نام هر نویسنده باید نوشته شود).

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

چکیده مبسوط باید به روشنی ارائه‌گر محتویات مقاله، بدون استفاده از علائم اختصاری، شکل، جدول و پاورقی بوده و به تفکیک دارای ساختاری به صورت مقدمه و هدف، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادها و واژگان کلیدی باشد. تعداد کلمه‌ها در چکیده مبسوط بدون احتساب عنوان مقاله و واژه‌های کلیدی، بایستی دارای کمینه ۶۰۰ و بیشینه ۹۰۰ کلمه باشد. برای فونت قسمت چکیده مبسوط، کلمات فارسی با قلم بی- نازنین ۱۲ و کلمات انگلیسی با قلم Times New Roman 11 استفاده شود. تعداد کلمات در هر قسمت از چکیده مبسوط، حتی‌المقدور، بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ کلمه باشد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، نشانی الکترونیکی نویسنده مسئول (قلم Times New Roman 11)

استناد: نام خانوادگی نویسنده اول، حرف اول نام نویسنده اول، نام خانوادگی نویسنده دوم، حرف اول نام نویسنده دوم، ... سال انتشار به عدد، عنوان کامل مقاله. پژوهش‌های آبخیزداری، ؟؟(؟): ؟؟-؟؟.

شناسه دیجیتال: (قلم Times New Roman 11)

تاریخ دریافت: ؟؟؟/؟؟/؟؟، **تاریخ بازنگری:** ؟؟؟/؟؟/؟؟، **تاریخ پذیرش:** ؟؟؟/؟؟/؟؟، **تاریخ انتشار:** ؟؟؟/؟؟/؟؟

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ؟؟؟، دوره ؟؟، شماره ؟؟، شماره پیاپی ؟؟؟، نام فصل، سال انتشار، صفحه‌های ؟؟ تا ؟؟.

© نویسنندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



مواد و روش‌ها

مواد و روش‌ها، در این قسمت آورده شود. (حتی‌المقدور بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ کلمه)

نتایج و بحث

نتایج و بحث، در این قسمت آورده شود. (حتی‌المقدور بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ کلمه)

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتیجه‌گیری و پیشنهادها در این قسمت آورده شود. (حتی‌المقدور بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ کلمه)

واژگان کلیدی

به ترتیب حروف الفبای فارسی و انگلیسی، با کمینه ۴ و بیشینه ۶ کلمه، در انتهای چکیده مبسوط آورده شود. (قلم بی-نازنین ۱۱ پررنگ)

مقدمه (قلم بی-نازنین ۱۲ پررنگ)

در این الگوی تهیه شده، نمونه روش تهیه مقاله برای «مجله علمی پژوهش‌های آبخیزداری» آمده است و قسمت‌ها و بخش‌های مختلف آن، انواع قلم‌ها و اندازه آن‌ها که در تهیه یک مقاله به کار می‌روند شرح داده شده است. برای سهولت کار، کلیه شیوه‌های مورد نیاز برای بخش‌های مختلف، از پیش تعریف شده و تنها کافی است که نویسنده، مقاله خود را با این شیوه‌نامه تطبیق و متن خود را در آن قرار دهد.

بخش‌های اصلی مقاله ارسالی به این نشریه بایستی به ترتیب دارای: عنوان فارسی، چکیده مبسوط فارسی، واژه‌گان کلیدی فارسی، مقدمه، مواد و روش‌ها (منطقه مطالعه‌شده و روش پژوهش)، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادها، سپاس‌گزاری (اختیاری)، تضاد منافع نویسندگان، دسترسی به داده‌ها، مشارکت نویسندگان، منابع، عنوان انگلیسی، چکیده مبسوط انگلیسی و واژگان کلیدی انگلیسی باشد.

مقاله با استفاده از نرم‌افزار MS Word 2010 نسخه ۲۰۱۰ یا بالاتر در فرمت DOCX و بیشینه ۱۴ صفحه تهیه شود.

متن مقاله باید در صفحات A4 با قلم نازنین ۱۲ معمولی برای کلمات فارسی و قلم Times New Roman 11 برای کلمات انگلیسی تایپ شود. بایستی فاصله متن از بالا در صفحه اول و صفحه عنوان انگلیسی ۵۰ میلی‌متر و در سایر صفحات ۳۰ میلی‌متر

باشد. در کلیه صفحات فاصله از پایین ۳۰ میلی‌متر و از چپ و راست نیز ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شود. متن مقاله به صورت دو ستونی با فاصله ۸ میلی‌متر بین دو ستون تایپ شود. فاصله سطرها باید تک فاصله‌ای (Single) باشد. هیچ پاراگرافی، نیاز به تورفتگی ندارد. عنوان‌های هر بخش از ابتدای ستون و بدون رها نمودن فاصله تایپ شود. عنوان فارسی هر بخش باید با قلم بی-نازنین پررنگ ۱۲ و عنوان انگلیسی با قلم Times New Roman 11 به صورت Bold تایپ شود. عنوان‌های فرعی فارسی با قلم بی-نازنین پررنگ ۱۱ و زیرعنوان انگلیسی با قلم Times New Roman 10 به صورت Bold نوشته شوند. در این نشریه از عدد و شماره‌گذاری، برای مشخص کردن ترتیب عنوان‌ها استفاده نمی‌شود. تا حد امکان، از به کار بردن کلمات انگلیسی در متن مقاله اجتناب شود و معادل فارسی آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

برای کلماتی که جدا شدن بخش‌های آن‌ها نیاز به یک فاصله کامل ندارد، از نیم‌فاصله استفاده شود. در عنوان مقاله و تمام بخش‌های مقاله، به جای استفاده از واژه "حوزه آبخیز" یا "حوزه آبریز" و موارد مشابه، از واژه فارسی "آبخیز" استفاده شود. همچنین به جای استفاده از "ی" در انتهای کلماتی که به "ه" ختم می‌شود از "ء" استفاده شود. مانند: (نادرست: منطقه‌ی. درست: منطقه).

نتیجه‌گیری درباره نتایج به‌دست آمده و تفسیر و جمع‌بندی یافته‌ها با تأکید بر مقایسه با پژوهش‌های مشابه، و تحلیل علمی نتایج به‌دست آمده و دادن پیشنهادها کاربردی، در این قسمت آورده می‌شود.

سپاس‌گزاری

نویسنده (نویسندگان) می‌توانند (در صورت تمایل) در این قسمت از سازمان‌ها، دانشگاه‌ها، و یا افرادی که در انجام این پژوهش او (ایشان) را یاری کرده‌اند سپاسگزاری و قدردانی کنند. (وجود این بخش، اختیاری است).

تضاد منافع نویسندگان

در صورتی که تضاد منافع در خصوص مقاله وجود دارد در این بخش قید شود، در غیر این صورت، عبارت زیر درج شود:

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در راستای نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

(وجود این بخش، الزامی است).

دسترسی به داده‌ها

در این بخش، شیوه دسترسی به داده‌ها و کدهای استفاده شده، و یا نقشه‌ها و نتایج تولید شده در پژوهش ذکر می‌شود. اگر داده‌ها و اطلاعات در متن مقاله ارائه شده است، ذکر شود که همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. اگر غیر از این، موارد اطلاعاتی قابل ارائه است؛ عبارت زیر درج شود: داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش، با مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار مخاطب قرار خواهد گرفت.

(وجود این بخش، الزامی است).

مشارکت نویسندگان

در این بخش شیوه مشارکت نویسندگان در انجام پژوهش ارائه می‌شود. برای درج این بخش، از شیوه زیر به‌عنوان نمونه می‌توان استفاده کرد. شایان ذکر است

مطالب مربوط به واژه‌نامه، توضیحات جانبی مختصر، معادل لاتین اسامی و اصطلاحات و بیان کامل واژه‌های مخفف بایستی به‌صورت زیرنویس او شماره‌دار و به‌صورت شماره‌گذاری پیوسته در پاورقی آورده شوند. در پاورقی، بایستی حروف فارسی با قلم بی-نازنین ۱۰ و حروف لاتین با قلم Times New Roman 9 تایپ شوند.

شیوه (Style) های مورد نیاز برای کلیه قسمت‌های مقاله، در این مقاله تعریف شده‌اند و مؤلفان می‌توانند پس از انتقال محتوای آن به این فایل با استفاده از Styles در منوی Home به‌سرعت فایل مقاله خود را با شیوه مورد نظر تطبیق دهند. این کار با استفاده از ابزارهای Copy | Past و Format Painter نیز در این مقاله به سادگی انجام‌پذیر است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

موقعیت جغرافیایی و دیگر مطالب برای معرفی منطقه پژوهش در این بخش آورده می‌شود. ارائه نقشه، در قالب موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه شده، در این بخش، توصیه می‌شود.

روش پژوهش

در این قسمت، روش پژوهش، به‌صورت دقیق و روشن، آورده می‌شود.

نتایج و بحث

در این بخش نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده در پژوهش، با تأکید بر یافته‌های جدید، همراه با بحث‌های مرتبط، آورده می‌شوند. در این قسمت از جدول‌ها، شکل‌ها، نمودارها نیز استفاده و بحث در مورد آن‌ها انجام می‌شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بی- نازنین پرننگ ۱۱ و قلم انگلیسی آن‌ها Times New Roman 10 Bold انتخاب شده و قلم انگلیسی همه نوشتار روی شکل‌ها، نمودارها و داخل جدول‌ها Times New Roman 10 باشند.

خط چهارچوب اطراف نمودارها برداشته شود و در جدول‌ها تنها خط‌های افقی بالا و پایین ردیف اول و خط افقی پایین ردیف آخر آورده شوند.

فقط جدول‌ها و شکل‌های کوچک مانند جدول ۱، که پهنایی متناسب با پهنای مطالب متن داشته باشند در داخل ستون قرار می‌گیرند.

جدول ۱- عنوان جدول (بی- نازنین ۱۱ پرننگ).

Table 1- (Times New Roman 10 Bold)

Model components	Factor	Index
Driving Force	D ₁	People
Response	R ₃	Cultural actions
Pressure	P ₅	Rainfall
State	S ₁	Drop rate

اگر پهنای شکل یا جدولی متناسب با پهنای مطالب متن نباشد (مانند شکل ۱ یا جدول ۲)، باید آن را به صورت تک ستونه آورد.

روش تغییر ستون از دو به یک یا برعکس در نسخه‌های مختلف ورد متفاوت است. به عنوان مثال در ورد ۲۰۱۶ روش کار انتخاب نوار Layout به صورت زیر می‌باشد:

Layout | Columns | More Columns

بعد از طی این مسیر با توجه به هدف، حالت دو ستونه یا تک ستونه انتخاب می‌شود و از فهرست کشویی Apply to گزینه This point forward را انتخاب می‌کنیم.

برای اجرای صفحه‌بندی مطلوب می‌توانید از سطرهای اضافه که قبل یا بعد از شکل‌ها، جدول‌ها یا منابع درج می‌کنید، بهره ببرید.

از آنجا که این مجله به صورت کاملاً رنگی منتشر می‌شود، لازم است که به‌منظور متمایز نمودن دیاگرام‌ها از رنگ‌های مختلف استفاده شود و از روش‌های متمایزسازی مختص تصاویر سیاه و سفید (مانند

می‌توان بخش‌هایی از انجام کار، برای افراد مشارکت‌کننده در مقاله مشترک باشد.

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله.

نویسنده دوم: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج.

نویسنده سوم: مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های آماری.

(وجود این بخش، الزامی است).

روابط ریاضی

روابط باید به ترتیب و در جدولی مشابه جدول زیر از ابتدا تا انتها شماره‌گذاری شوند.

$$(x + a)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k a^{n-k} \quad (1)$$

شماره معادلات باید در انتهای سمت راست هر ستون و در امتداد خط حاوی معادلات و در پرانتز قید گردد. توضیحات تمام متغیرها، سنج‌ها و نمادهای جدید در روابط، چنانچه پیش از آن توضیح داده نشده‌اند، باید بدون فاصله بعد از رابطه بیان شوند. نکته دیگر اینکه از درج فرمول به فرمت تصویر اجتناب شود و از روابط فرمول نویسی در نگارش آنها استفاده کنید تا افت کیفیت در نسخه نهایی نداشته باشیم.

سیستم واحدها

سیستم واحد قابل قبول، سیستم بین‌المللی (SI) بوده و در مواقع ضروری، باید معادل آن در سیستم آحاد دیگر در داخل پرانتز به کار رود.

توضیحات در مورد جدول‌ها و شکل‌ها و نمودارها

جدول‌ها و شکل‌ها باید به‌ترتیبی که در متن به آن‌ها اشاره شده است شماره‌گذاری و جا داده شوند. عنوان جدول‌ها در بالای آن‌ها، و عنوان شکل‌ها در زیر آن‌ها به دو زبان فارسی و انگلیسی وسط‌چین نوشته شود. عنوان انگلیسی در زیر عنوان فارسی قرار گیرد. همه نوشتار روی شکل‌ها، نمودارها و داخل جدول‌ها باید به انگلیسی باشد. قلم فارسی عنوان جدول‌ها و شکل‌ها

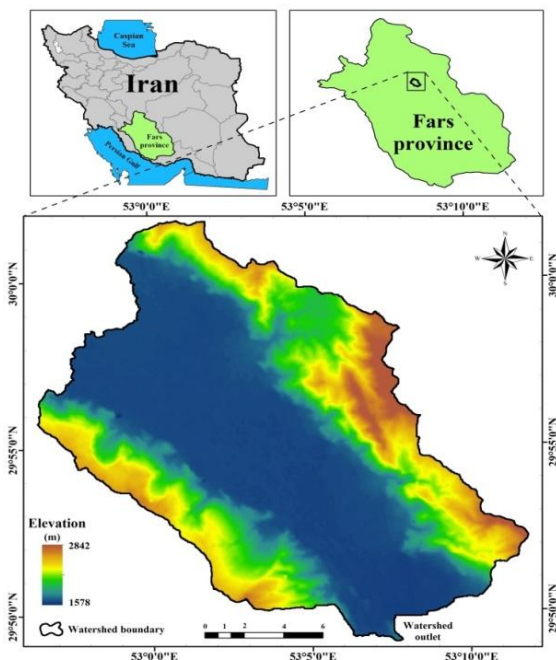
با ذکر تاریخ منبع مورد استفاده (بر حسب سال میلادی)، در داخل علامت دو کمان () نوشته شوند. مانند: کوثر (۲۰۱۹)، و یا تامسون و همکاران (۲۰۲۱). اگر منبع ا ستفاده شده در پایان جمله آورده می شود، نام نویسنده و تاریخ باید درون دو کمان () نوشته شود. مانند: (احمدی ۲۰۲۲)، و (برادفورد و همکاران ۲۰۲۳).

فهرست منابع در پایان مقاله به ترتیب حروف الفبا آورده شود، و هیچ منبعی در زیرنویس آورده نشود.

استفاده از ضخامت خطوط مختلف، نمادها و یا استفاده از خطوط ممتد، نقطه چین و خط چین) پرهیز شود.

روش ارجاع در متن

روش این نشریه بر اساس توصیه‌های شورای ویراستاران علمی (سی‌اس‌ای^۳) در وبگاه مربوطه^۴ در ویراست هفتم کتاب مرجع آنان به نام روش و قالب علمی: دست‌ورکار سی‌اس‌ای برای نویسندگان، ویراستاران و ناشران (۲۰۰۶) و با انتخاب روش نام سال سی‌اس‌ای است. همه منابع (اعم از فارسی و انگلیسی) مورد استفاده در متن مقاله باید با نام نویسنده(گان)، به زبان فارسی، و



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مطالعه‌شده.

Figure 1- Geographical location of the study area.

۱. ارجاع به منبع را با آوردن نام(های) نویسنده(گان) و پس از آن سال انتشار نوشته انجام دهید. در هر ارجاع برای جدا کردن نام و تاریخ از دو کمان () استفاده کنید. پس از نام یک فاصله خالی بگذارید، اما ویرگول نگذارید: تازه‌ترین پژوهش بر شدت بارندگی در این منطقه (سیپیون ۲۰۱۹) نشان می‌دهد که ..
 ۲. اگر نام نویسنده بخشی از جمله است، تنها تاریخ را در دو کمان () بگذارید:
 مثال: هاگیهارا و اینو (۲۰۲۱) دریافتند که ...

۳- CSI

مثال: وایل (۱۹۹۹، ۲۰۱۰، ۲۰۲۲) مدل‌های مختلف برآورد سیلاب را شرح داده است.
۵. بیش از دو کار انجام شده یک نویسنده در یک سال: برای تمایز میان منابع چاپ شده از یک نویسنده در یک سال از حروف الفبا (الف، ب، و مانند آن‌ها) استفاده کنید. این ترتیب را هنگام فهرست کردن آن‌ها در بخش منابع نیز حفظ کنید.
مثال: راش (۲۰۲۰الف، ۲۰۲۰ب) پذیرفت که ...

۳. کار انجام شده بیش از دو نویسنده: نام نویسنده اصلی، سپس عبارت "و همکاران" و بعد تاریخ را بنویسید.

مثال: (هاگیهارا و همکاران ۲۰۲۳)

۴. بیش از دو کار انجام شده یک نویسنده: نام نویسنده و سپس تاریخ‌ها را به ترتیب زمانی بیاورید. برای جدا کردن تاریخ‌ها یک ویرگول و یک فاصله بگذارید:

جدول ۲- عنوان جدول (قلم بی- نازنین ۱۱ پررنگ).

Table 2- (Times New Roman 10 Bold)

Component	Number of items	Calculated Cronbach's alpha
Driving force (D)	5	0.845
Pressure (P)	6	0.720
Response (R)	7	0.913

جدا نمی‌شود. حرف اول تنها در اولین واژه عنوان مقاله با حروف بزرگ نوشته می‌شود.

۲. پس از نام نویسنده، سال انتشار می‌آید. سپس یک نقطه، عنوان مقاله، نام مجله، یک نقطه، شماره مجلد نشریه، شماره انتشار در داخل دو کمان (،)، یک نشانه دوقطه (:،) و صفحه‌های مقاله آورده می‌شود. برای نوشتن شماره صفحه، همه شماره‌ها را بیاورید: (۱۰۴۵-۱۰۳۷، ۱۰۳۷، نه ۴۵-۱۰۳۷). برای فاصله میان دو شماره صفحه از فاصله متوسط (خطِ ان) - به جای خط تیره - استفاده کنید (نادرست: ۲۳۵-۲۵۰، درست: ۲۵۰-۲۳۵).

۳. در انتهای منابعی که نسخه اصلی آن فارسی است باید در داخل پرانتز کلمه *In Persian* آورده شود.

۴. فهرست منابع را شماره‌گذاری نکنید.

۵. عنوان نشریات و مجلات علمی را به شکل کامل بیاورید. حرف اول عنوان هر نشریه یا مجله باید بزرگ باشد و بقیه حروف کوچک باشد.

مثال‌های لازم برای نگارش فهرست منابع

Berengena J, Gavilan P. 2005. Reference evapotranspiration estimation in a highly adjective semiarid environment. *Irrigation and Drainage Engineering*, 131(2):147-163.

Naderi N, MohseniSaravi M, Malekian A, Ghasemian D. 2011. Analytical Hierarchy

۶. کارهایی که یک سازمان به‌جای نویسنده منتشر کرده است: نام سازمان یا گروه را پیش از تاریخ چاپ بنویسید. مثال: اندازه‌های دقیق مصرف آب در ایالت‌های مختلف به‌تازگی منتشر شده است (خدمات ملی آمار کشاورزی ۲۰۲۱).

اگر نام این سازمان‌ها بسیار طولانی است، یا باید بارها در نوشتار به آن‌ها ارجاع دهید، می‌توانید کوتاه‌شده نام اصلی آن‌ها را بنویسید:

مثال: اندازه‌های دقیق مصرف آب در ایالت‌های مختلف به‌تازگی منتشر شده است (یواس دی ای ۲۰۰۰).

در فهرست منابع نیز نخست واژه کوتاه‌شده و سپس نام کامل را بیاورید.

مثال:

USDA-National Agricultural Statistics Service. 2000.

فهرست منابع

همه منابع مورد استفاده در متن مقاله (فارسی و انگلیسی) باید با الفبای انگلیسی و با دستورکار نشریه آورده شود و قلم آن Times New Roman 10 و هر منبع در صورت داشتن شناسه دیجیتال یا DOI؛ **حتماً لازم است این‌کد نیز به‌طور کامل، نوشته شود.**

۱. پس از نام‌خانوادگی، تنها حرف اول نام کوچک نویسنده‌ها می‌آید و این حرف‌ها با نقطه یا فاصله از هم

Process technique for deciding watersheds. *Journal of Environment and Development*, 4(2): 41–50. (In Persian).

Subramanya K. 1994. *Engineering Hydrology*. Tata McGraw–Hill Education.

Castejon M, Romero–Munoz F, Garcia L. 1987. Phenology and control of *Orobanche cornea* in sunflower with glyphosate. In: Weber HC, Forstreuter W, Editors. *Parasitic flowering plants*. Marburg, F.R.G., pp. 121–126.

USDA–National Agricultural Statistics Service. 2000. Published estimates data base (PEDB) [Online]. Available at <http://www.nass.usda.gov:81/ipedb/> (accessed 15 May 2001; verified 24 Aug. 2001. USDA–NASS, Washington, DC. USA.

Ghorbani M. 2012. The role of social networks in operation mechanisms of rangeland (Case Study: Taleghan area). Ph.D. Dissertation. Faculty of Natural Resources. Tehran University, 430 p. (In Persian).

Niknahad Gharemakher H, Aghtabye A, Akbarlou M. 2018. Effects of grazing exclusive on some soil properties, erodibility and carbon sequestration (Case study: Bozdaghin rangelands, North Khorasan, Iran). *Iranian Journal of Range and Desert Research*. 24(4):708–718. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2017.114058>. (In Persian).

Ph.D. Dissertation. Faculty of Natural Resources. Tehran University, 430 p. (In Persian).



Title (Font: Times New Roman 14 Bold)

Author^{1*}, Author², Author³ (Font: Times New Roman 10 Bold)

- 1- Position, Department, Faculty (Office of an organization), University (Organization), City, Country (Font: Times New Roman 10)
- 2- Position, Department, Faculty (Office of an organization), University (Organization), City, Country (Font: Times New Roman 10)
- 3- Position, Department, Faculty (Office of an organization), University (Organization), City, Country (Font: Times New Roman 10)

Extended Abstract (Font: Times New Roman 12 Bold)

Introduction and Goal (Font: Times New Roman 11 Bold)

The extended abstract must include the title, author(s), introduction and objective, materials and methods, results and discussion, conclusion and suggestions. The extended abstract should be typed with single spacing using size 11 Times New Roman font. Extended abstract should summarize the contents of the paper and contain a minimum of 700 and maximum of 1000 words (With a logical balance between different sections of the abstract). Figures or Tables should not be included in the extended abstract. The total number of words should be about 200-250 words in the Introduction and objective section.

Materials and Methods (Font: Times New Roman 11 Bold)

The methodology must be clearly stated and described in sufficient detail or with sufficient references. The total number of words should be about 200 to 250 words in this section.

Results and Discussion (Font: Times New Roman 11 Bold)

The findings and arguments of the work should be explicitly described. Note that no Tables, images and figures should be provided in the results and discussion section. The total number of words should be about 200 to 250 words in this section.

Conclusion and Suggestions (Font: Times New Roman 11 Bold)

Conclusions should include (1) the principles and generalizations inferred from the results, (2) any exceptions to, or problems with these principles and generalizations, (3) theoretical and/or practical implications of the work, and (5) conclusions drawn and recommendations. This section should contain about 200-250 words.

Keywords: The authors should provide four to six keywords that are consistent with those in Persian (Font: Times New Roman 10 Bold)

Article Type: Research Article

*Corresponding Author E-mail: ??????

Citation: ?????, ?, ?????, ?, ?????, ?. Year ????. Title paper. Watershed Management Research. ??(?): ??-??.

DOI: ????????????????

Received: ????????, **Received in revised form:** ????????, **Accepted:** ????????,

Published online: ????????

Watershed Management Research, Vol. ??, No.?, Ser. No: ???, Season ????, pp. ??-??.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center ©Author(s)



Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the University of **XXXXXX** for the financial and logistical supports who significantly contributed during the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article. **If there is a conflict of interest, please state it in this section.**

Data Availability Statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author. **/OR/** We have no permission to release data and codes.

Authors' Contribution

(For Example) Name and Family of Author 1: Writing - original draft preparation

(For Example) Name and Family of Author 2: Resources, Software, Manuscript editing

(For Example) Name and Family of Author 3: Formal analysis and investigation

(For Example) Name and Family of Author 4: Visualization, Supervision

(For Example) Name and Family of Author 5: Conceptualization, methodology

Watershed Management Research Journal

Founder: Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Fars
Agricultural and Natural Resources Research and Education Center
ISSN: 2981-2038 Vol. 38, No. 1, Ser. No. 146, Spring 2025

Director in Chief: A. Moradi - Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Fars
Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research,
Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

Editor in Chief: A.A. Noroozi- Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research
Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

Editorial Board :

M.T. Dastorani- Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural
Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad

S.Y. Eerfanifard- Associate Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of
Geography, Tehran University

A.H. Haghiabi- Professor, Department of Water Engineering, Lorestan University Ataollah Kavian-
Professor, Department of Watershed Management, Sari Agricultural and Natural Resources
University

D. Khalili - Professor, Water Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University,
Shiraz, Iran A.A. Noroozi- Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research
Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

S.M. Soleimanpour- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research
Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural
Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran M. Soufi- Emeritus
Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars
Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research,
Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

M. Zare- Professor of Earth Sciences Department, College of Sciences, Shiraz University

Executive Manager: S.M. Soleimanpour- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed
Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education
Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

Language Editor and Editorial Office: M. Enayati - M.Sc. Expert, Soil Conservation and
Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research
and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO),
Shiraz, Iran

Statistics Consultant: L. Jowkar- Emeritus Fellow, Fars Agricultural and Natural Resources
Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization
(AREEO), Shiraz, Iran

Page Layout Expert: P. Haghighi - M.Sc. Expert, Soil Conservation and Watershed Management
Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center,
Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

Address: Office of the Journal of Watershed Management Research, Fars Agricultural and Natural
Resources Research and Education Center, Janbazan Ave. Modarres Blvd. Shiraz, I.R. Iran

Postal code: 71558-63511

POB: 71555-617

Phone: +987137204959

Website: <http://wmrj@areeo.ir>

Email: wmrj@areeo.ac.ir



Watershed Management Research

146

ISSN: 2981-2038

Vol. 38, No. 1, Ser. No. 146, Spring 2025

- **The performance evaluation of machine learning models and optimization algorithms for predicting the River Discharge of Kashkan River**
Fatemeh Avazpour, Mohammad Reza Hadian, Ali Talebi..... 1
- **Determination the Quantitative Impact of Drought and Human Factors on Groundwater Level Decline in the Kohdasht Aquifer, Lorestan Province**
Reza Chamanpira, Mehran Zand, Ebrahim Karimi Sangchini, Elham Davoodi 19
- **Evaluating the Effect of Drought on the Temporal Recharge Pattern of Aquifers in the Damghanroud Watershed**
Mahain Khosravi, Mohammad Reza Yazdani 38
- **The Effect of Changes in Climate parameters on the Mobility and Stability of Sand Dunes in the Watershed of Lake Urmia - Mahabad Station**
Ahmad Najafi Imdir, Alireza Majidi..... 61
- **Predicting the Effect of Climate Change on Rainfall Erosivity in the Talar Watershed of Mazandaran Province, Iran**
Shamim Ahmadi, Ataollah Kavian, Karim Soleimani, Kaka Shahidi, Abdul Vahid Khalidi Darwshan 78
- **Recreating of Watershed Sustainability Index (WSI) Based on Driving Force-Pressure-State-Impact-Response Framework in the Beheshtabad Watershed**
Rafat Zare Bidaki, Shahin Drakhshan, Siamak Kheybari, Henrique Marinho L Chaves 96
- **Investigation of Effective Factors on Landslide Occurrence and Susceptibility Zonation Using the Dempster-Shafer Model in the Middle Mazlaghan Chai, Markazi Province**
Soheila Rowshanzamir 113
- **Predicting Suspended Sediment using a Hybrid Model of Sediment Rating Curve and Artificial Neural Network at the Naroun Afjeh Station**
Golaleh Ghaffari 128