

- بررسی نقش عامل‌های مؤثر در طغیان رود تلار مازندران در رخداد اسفند ۱۳۹۷ با استفاده از مدل HEC-RAS
ولی‌الله کریمی، محمدعلی هادیان‌امری ۲
- بررسی و شناسایی سنگفرش‌های بیابانی در شهرستان سمنان با استفاده از تصویرهای سنجنده +ETM
حریر سهرابی، هایده آراء، محمدکیا کیانیان، امین صالح‌پورچم ۱۵
- واکاوی تغییرات زمانی- مکانی شاخص‌های حدی بارش تحت تأثیر تغییر اقلیم در ایران
سپیده چویه، بهنوش فرخ‌زاده، ام‌البنین بذرافشان، هانیه حسونند ۳۴
- تحلیلی بر گرانیگاه بارش در شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی استان اردبیل
زینب جزبوی، وحیده مرادزاده، مهین حنیفه‌پور، نازیلا علایی ۵۴
- ارزیابی فرسایش آبکندی با استفاده از مدل‌های وزن شاهد (WofE) و دمپستر-شیفر (DSH) در آبخیز ایلام
شمس‌اله عسگری، کوروش شیرانی، فریدون سلیمانی ۷۱
- ارزیابی نقش خصوصیات بارش و آتش‌سوزی تجویزی بر اندازه رواناب و آبشویی عناصر مغذی خاک در پارک جنگلی چغاسبز ایلام
طاهره ارغند، نورالدین رستمی، مهدی حیدری، مرتضی قیصوری ۹۹
- صحت‌سنجی استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز برای برآورد فرسایش پاشمانی و سطحی
رضازارعی، مصطفی آدمی، عبدالواحد خالدی درویشان ۱۱۹
- بررسی تأثیرات خشک‌سالی بر کیفیت منابع آب سطحی پل‌دختر
مسعود گودرزی، رحیم کاظمی ۱۳۵

نشریه علمی "پژوهش‌های آبخیزداری"

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

دوره ۳۷، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۴۵، زمستان ۱۴۰۳

درجه علمی - پژوهشی این نشریه به استناد نامه شماره ۱۹۲۹۱۶/۱۸/۳ 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

سرمدبیر: 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):

امیرحمزه حقی‌آبی - 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 محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

محمد زارع - استاد بخش علوم زمین دانشکده علوم دانشگاه شیراز

سیدمسعود سلیمان‌پور - 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 عرفانی‌فرد - دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

عطالله 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: سیدمسعود سلیمان‌پور - 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

این نشریه در پایگاه‌های استنادی علوم جهان اسلام (ISC) با ISSN ۱۰۱۹-۹۶۳۲ به نشانی <https://isc.gov.ir> نظام نمایه‌سازی

مرکز منطقه‌ای اطلاع‌رسانی 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 نشریه‌ی پژوهش‌های آبخیزداری.

صندوق پستی: ۶۱۷-۷۱۵۵۵

دورنگار: ۳۷۲۰۶۳۷۶ (۰۷۱)

رایانامه: wmrj@areeo.ac.ir

کد پستی - ۶۳۵۱۱-۷۱۵۵۸

تلفن: ۳۷۲۰۴۹۵۹ (۰۷۱) داخلی - ۲۲۴

تارنما: <http://wmrj.areeo.ir>

- ۲ بررسی نقش عامل‌های مؤثر در طغیان رود تالر مازندران در رخداد اسفند ۱۳۹۷ با استفاده از مدل HEC-RAS
ولی‌الله کریمی، محمدعلی هادیان‌امری
- ۱۵ بررسی و شناسایی سنگفرش‌های بیابانی در شهرستان سمنان با استفاده از تصویرهای سنجندهٔ ETM+
حریر سهرابی، هایدآرا، محمدکیا کیانیان، امین صالح‌پورجم
- ۳۴ واکاوی تغییرات زمانی- مکانی شاخص‌های حدی بارش تحت تأثیر تغییر اقلیم در ایران
سپیده چوبه، بهنوش فرخزاده، ام‌البنین بذرافشان، هانیه حسنونند
- ۵۴ تحلیلی بر گرانیگاه بارش در شبکهٔ ایستگاه‌های باران‌سنجی استان اردبیل
زینب حزبوی، وحیده مرادزاده، مهین حنیفه‌پور، نازیلا علانی
- ۷۱ ارزیابی فرسایش آب‌کندی با استفاده از مدل‌های وزن شاهد (WofE) و دمپستر-شیفر (DSH) در آبخیز ایلام
شمس‌اله عسگری، کوروش شیرانی، فریدون سلیمانی
- ۹۹ ارزیابی نقش خصوصیات بارش و آتش‌سوزی تجویزی بر اندازهٔ رواناب و آبشویی عناصر مغذی خاک در پارک جنگلی چغاسبز ایلام
طاهره ارغند، نورالدین رستمی، مهدی حیدری، مرتضی قیصوری
- ۱۱۹ صحت‌سنجی استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز برای برآورد فرسایش پاشمانی و سطحی
رضا زارعی، مصطفی آدمی، عبدالواحد خالدی‌درویشان
- ۱۳۵ بررسی تأثیرات خشک‌سالی بر کیفیت منابع آب سطحی پُل‌دختر
مسعود گودرزی، رحیم کاظمی



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مازان تحقیقات و آموزش و ترویج کشاورزی

بررسی نقش عامل‌های مؤثر در طغیان رود تلار مازندران در رخداد اسفند ۱۳۹۷ با استفاده از مدل HEC-RAS

ولی‌الله کریمی^{۱*}، محمدعلی هادیان‌امری^۲

- ۱ - استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران
- ۲ - استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

رخداد بارش‌های شدید که در مدت زمان کوتاه حجم زیادی از نزولات جوی را به‌همراه دارد، غالباً باعث بروز مشکلات پرشماری برای جوامع انسانی، گیاهی و جانوری می‌شود. سیل ویرانگر ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ در شهرستان سیمرغ، خسارت‌های مالی زیادی را به‌همراه داشت. شبیه‌سازی‌های آب‌شناسی جریان سیل در رود تلار از بالادست شهر کیاکالا تا بعد از شهر، این امکان را فراهم کرد تا عامل‌های بروز آب‌گرفتگی شهر کیاکالا در اسفند ۱۳۹۷ شناسایی شود تا بتوان از تکرار چنین پیشامدی جلوگیری کرد. هدف این پژوهش شبیه‌سازی آب‌نمود رخداد سیل ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ رود تلار در محدوده شهر کیاکالا با مدل رایانه‌ای HEC-RAS و تعیین نقش عامل‌های مؤثر در بروز سیلاب در منطقه مطالعه‌شده و پیشنهاد راهکارهای اجرایی برای جلوگیری از بروز آب‌گرفتگی زمین‌های مجاور رود تلار در محدوده شهر کیاکالی استان مازندران بود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، منطقه مطالعه‌شده بازه ۱۰ کیلومتری از رود تلار در محدوده شهرستان سیمرغ در استان مازندران بود. در این بازه سه پل نجارکلا، ملاکلا و برج خیل بودند که تمام مشخصات هندسی آنها به همراه مختصات جغرافیایی، داده‌های مربوط به بلندی و فاصله‌های نقاط در ۲۶ مقطع عرضی متوالی با استفاده از دوربین نقشه‌برداری تئودولیت و جی پی اس چندبسماد، برداشت شد. آب‌نمود سیل ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ با استفاده از مدل HEC-RAS شبیه‌سازی شد. برای به‌دست آوردن دوره بازگشت سیلاب ۲۷ اسفند ۱۳۹۷، تحلیل فراوانی داده‌های تاریخی ۶۵ ساله بده رود تلار در ایستگاه کیاکالا با نرم افزار ایزیفیت

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Vkarimi۸۰@gmail.com

استناد: کریمی، و.، هادیان‌امری، م.ع. ۱۴۰۳. بررسی نقش عامل‌های مؤثر در طغیان رود تلار مازندران در رخداد اسفند ۱۳۹۷ با استفاده از مدل HEC-RAS. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۷ (۴): ۱۴-۲.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2024.364406.1564

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۳، دوره ۳۷، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۴۵، زمستان ۱۴۰۳، صفحه‌های ۲ تا ۱۴.

© نویسندگان

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



انجام شد. بستر رود بر اساس سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ ساله و حریم کمی رود در بازه مطالعه شده، با روش DLSRS که در دستورالعمل تعیین حریم کمی رودها آورده شده است، تعیین شد.

نتایج و بحث

تحلیل توزیع فراوانی داده های تاریخی بده ایستگاه آب سنجی کیاکلا رود تالر با نرم افزار ایزیفیت نشان داد که دوره بازگشت اوج سیلاب لحظه ای ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ برابر ۲۴ سال بود. شبیه سازی آب نمود سیلاب ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ روی بازه مطالعه شده رود تالر نشان داد که تمام مقاطع رود و هر سه پل برای عبور جریان ظرفیت کافی داشتند و به بستر رود در مسیر مطالعه شده آسیبی وارد نشد اما، به بخش بزرگی از نوار حریم ۲۰ متری دو طرف رود با کاشت درختان متمر آسیب وارد شد که البته هیچ تاثیری بر بروز آب گرفتگی های ناشی از سیلاب ۲۷ اسفند سال ۱۳۹۷ در شهرستان سیمرغ نداشت.

نتیجه گیری و پیشنهادها

آب گرفتگی شهر کیاکلا و روستاهای پیرامون به دلیل نامناسب بودن ابعاد هندسی پل نبود، بلکه به دلیل گرفتگی دهانه پل با تنه و سرشاخه های درختان حمل شده از بالادست آب خیز به محل پل بود که این یافته نیز همانند شمار قابل توجهی از بلاهای طبیعی تأیید کننده بی توجهی و اهمیت ندادن به عملیات آب خیزداری در آب خیزهای منابع طبیعی بالادست است. جلوگیری از تغییر کاربری زمین های جنگلی و مرتعی در آب خیزهای کوهستانی و ساخت سازه های تقاطعی جمع آوری کننده اجسام شناور و غوطه ور در آب در آب خیزهای بالادست اقدام هایی هستند که احتمال تکرار چنین پیامدهایی را به حداقل ممکن می رسانند.

واژگان کلیدی: آب گرفتگی، بده سیلاب، شبیه سازی سیلاب، HEC-RAS

مقدمه

هدف این پژوهش شبیه سازی آب نمود رخداد سیل ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ رود تالر در محدوده شهر کیاکلا با مدل کامپیوتری HEC-RAS و تعیین نقش عامل های مؤثر در بروز سیلاب در منطقه مطالعه شده و پیشنهاد راهکارهای اجرایی برای جلوگیری از بروز آب گرفتگی زمین های مجاور رود تالر در محدوده شهر کیاکلا استان مازندران بود.

روشان و همکاران (۲۰۱۳) رفتار آب سنجی رود بشار در استان کهگیلویه و بویراحمد را با استفاده از مدل HEC-RAS در محیط GIS بررسی کردند. ایشان با شبیه سازی سیلاب رود، توانستند خسارت های سیل را در شرایط گوناگون اجرای طرح های مهندسی رود، مطالعات توجیهی اقتصادی - اجتماعی برنامه های مهار سیل را برآورد کنند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل HEC-RAS می تواند اندازه های عددی مناسبی را برای مطالعه خصوصیات آب سنجی جریان در رودها پیشنهاد دهد و برای پهنه بندی سیلاب با دقت زیاد و هزینه اندک استفاده شود.

کاردان و همکاران (۲۰۱۸) شبیه سازی دو بعدی جریان های سیلابی با دروه بازگشت ۱۰۰ ساله رود گرگان رود در محدوده شهر آق قلا را با مدل CCHE2D انجام دادند. ایشان نقشه های شاخص خطرات را تهیه کردند و اندازه خسارت های وارده را زیاد، مساحت پهنه پرخطر را گسترده و سرانجام تخلیه شهر را امری ضروری گزارش کردند.

راد و همکاران (۲۰۱۸) با بهره گیری از مدل آب سنجی HEC-RAS پهنه بندی سیل پائین دست آب خیز خرم آباد استان لرستان را بررسی کردند و دریافتند که پهنه سیل با دوره

رخداد بارش های شدید که در مدت زمان کوتاه حجم زیادی از نزولات جوی را به همراه دارد غالباً باعث بروز مشکلات پرشماری برای جوامع انسانی، گیاهی و جانوری می شود. سیل شایع ترین فاجعه در سراسر جهان است که پیامدهای زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی فراوانی را بر جای می گذارد و سالانه جان میلیون ها انسان را به خطر می اندازد. دشت های سیلابی و مناطق مجاور رودها به دلیل شرایط خاص، فضاهای مناسبی برای انجام فعالیت های اقتصادی و اجتماعی به شمار می روند و پیوسته در معرض خطرات ناشی از رخداد سیلاب ها هستند. سیل یکی از بلاها و رویدادهای طبیعی است که کشور ایران نیز از این بلا در امان نبوده و سالانه خسارت های مالی و جانی زیادی را در اثر سیل متحمل می شود (اخوان و همکاران ۲۰۲۱).

در استان مازندران سیل اسفند ماه سال ۱۳۹۷ ناشی از بارش دو روزه با اندازه ۳۰۰ میلی متر بود که باعث فوت ۱۳ نفر و مجروح شدن حداقل ۱۱۶ نفر شد. کل خسارت مالی وارده به بخش های گوناگون در استان مازندران ۲۶۵ میلیارد تومان برآورد شد. شهرستان سیمرغ با یک شهر به نام کیاکلا و دو بخش مرکزی با نه روستا و بخش تالارپی با ۱۵ روستا بود که بخش بزرگی از آن در معرض این سیلاب قرار گرفت (قصابیان ۲۰۱۹).

شبیه سازی های آب سنجی جریان سیل در رود تالر از بالادست شهر کیاکلا تا بعد از شهر، این امکان را فراهم کرد تا عامل های بروز آب گرفتگی شهر کیاکلا در اسفند ۱۳۹۷ شناسایی شود تا بتوان از تکرار چنین پیشامدی جلوگیری کرد.

از مدل HEC-RAS و GIS برای نقشه‌برداری از مناطق سیل بسیار زیاد بود.

در ترکیه، دمیر و کیسی (۲۰۱۶) پهنه‌بندی سیل رود مرت در سامسون را با به‌کارگیری سامانه اطلاعات جغرافیایی و مدل آب‌سنجی HEC-RAS انجام دادند. این پژوهشگران دریافتند که در این منطقه افزودن خاکریز به‌عنوان مانع و تنظیم پائین‌دست رود می‌تواند در کاهش خطر سیل مؤثر باشد.

در مالزی، شهیرپارسا و همکاران (۲۰۱۶) شبیه‌سازی و پهنه‌بندی رود سانگای ماکا را با استفاده از مدل تک‌بعدی HEC-RAS و مدل دوبعدی CCHE2D انجام دادند. این پژوهشگران دریافتند که بیشتر نتایج با هر دو مدل یکسان بود و تفاوت آنها مربوط به شکل رود است.

در پاکستان، خاتاک و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل آب‌سنجی HEC-RAS و روش‌های GIS پهنه‌بندی سیل رود کابل را انجام دادند. با شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با نرم‌افزار HEC-RAS مشخص شد که با احتمال زیاد بیش از ۴۰٪ زمین‌های پیرامون این رود در معرض سیلاب‌های سنگین خواهند بود.

بهندری و همکاران (۲۰۱۷)، از قابلیت دو بعدی مدل آب‌سنجی HEC-RAS برای تهیه نقشه پهنه‌بندی سیل در ناحیه پائین‌دست آبخیز رود برازو استفاده کردند. برای تجزیه و تحلیل، بخشی از رود با طول ۲۰ کیلومتر در ریچموند تگزاس در نظر گرفته شد. برای واسنجی مدل، ضریب زبری مانینگ بازه رود را با منحنی‌سنج پائین‌دست بازه مقایسه کردند. پس از شبیه‌سازی، از بلندی سطح آب و توزیع سرعت مربوطه برای تعیین محدوده سیل استفاده شد. برای این کار، از قابلیت ترسیم RAS در نرم‌افزار HEC-RAS استفاده کردند.

در شمال تونس، ازین و همکاران (۲۰۲۰) با کمک مدل آب‌سنجی HEC-RAS پهنه‌بندی سیل ۲۸ فوریه ۲۰۱۵ در آبخیز مدجدا را انجام دادند. منطقه شهری و حومه آن به‌طور کامل تحت تأثیر این سیل بودند. نتایج نشان داد که بلندی این سیل در مناطق سیل‌زده به بیش از شش ۶ متر رسید. نتایج مدل HEC-RAS با استفاده از تصویر رادار سنتینل-۱ که در آن روز به‌دست آمده بود، اعتبارسنجی شد.

در شمال عراق، الحسین و همکاران (۲۰۲۲) برای تحلیل و مدل‌سازی خطرات سیل رود خزیر از تلفیق مدل HEC-RAS با الحاقیه HEC-GeoRAS در ArcGIS استفاده کردند. بر پایه نقشه طبقه‌بندی ژرفای سیلاب، خطر سیلاب در ۸۰/۳۱٪ زمین‌ها کم تا خیلی کم، در ۱۶/۰۳٪ زمین‌ها متوسط و در ۳/۸٪ زمین‌ها خیلی زیاد بود. نتایج این پژوهش نشان داد که روستاهای نزدیک مصب رود در مقایسه با روستاهای دورتر از پائین‌دست، بیشتر در معرض سیل بودند. واشیست و سینگ (۲۰۲۳)، برای پهنه‌بندی سیل در آبخیز رود کریشنا از مدل دوبعدی HEC-RAS و مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM) منطقه با وضوح ۱۲/۵ و ۳۰ متر استفاده کردند

بازگشت دوساله با بده ۱۴۵ مترمکعب بر ثانیه، ۶۳/۸ کیلومتر مربع بود، و برای سیل با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله با بده ۵۵۳ متر مکعب بر ثانیه، این پهنه ۱۰ کیلومتر مربع بود که ۴/۴ کیلومتر مربع از این پهنه مربوط به زمین‌های دیم، ۴/۲ کیلومتر مربع زمین‌های مرتعی، ۴/۱ کیلومتر مربع زمین‌های مسکونی، ۶/۱ کیلومتر مربع جاده و ۲/۰ کیلومتر مربع زمین‌های رهاشده بودند.

پناهی و همکاران (۲۰۱۹) پهنه‌بندی زمین‌ریخت‌شناختی خطرات سیلاب رود گاماسیاب در استان کرمانشاه را با مدل HEC-RAS انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که برای دوره بازگشت ۲۵ ساله پهنه‌ای بیش از ۳۴ کیلومتر مربع و برای دوره بازگشت ۱۰۰ ساله پهنه‌ای نزدیک به ۴۲ کیلومتر مربع از زمین‌های کشاورزی، مناطق مسکونی روستایی و مراتع در معرض خطرات سیلاب بودند و اندازه خسارت‌های سیلاب ۱۰۰ ساله در مقایسه با سیلاب ۲۵ ساله، ۶/۲۵٪ بیشتر بود.

حجازی و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از مدل HEC-RAS و الحاقیه HEC-GeoRAS خطر رخداد سیلاب رود ورکش‌چای با طول ۶۹ کیلومتر که یکی از سرشاخه‌های اصلی رود آجی‌چای در استان آذربایجان شرقی است را مطالعه کردند. با شبیه‌سازی و پهنه‌بندی سیل با دوره بازگشت‌های ۲۵ و ۵۰ ساله مشخص شد که بیش از نیمی از روستاهای مجاور با مسیر رود تحت تأثیر سیلاب بودند و خسارت دیدند. سرانجام راهکارهایی برای کاهش خسارت به روستاها و زمین‌های مجاور رود پیشنهاد دادند.

دامادی و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل آب‌سنجی HEC-RAS پهنه‌بندی سیلاب آبخیز سرباز را انجام دادند. نقشه پهنه‌بندی سیلاب آبخیز محدوده شهر راسک با دوره بازگشت‌های مد نظر با کمک مدل آب‌سنجی HEC-RAS تهیه شد. نتایج نشان داد که با دوره بازگشت‌های ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله به‌ترتیب ۳۶۶، ۳۹۷، ۴۵۰ و ۵۸۱ هکتار از پهنه سیلاب آبخیز سرباز در محدوده شهر راسک افزایش یافت.

اسفندیاری‌درآباد و همکاران (۲۰۲۲) شبیه‌سازی زمین‌شناختی رخداد سیلاب در رود نوران‌چای استان اردبیل را با مدل آب‌سنجی HEC-RAS انجام دادند و دریافتند که برای دوره بازگشت‌های ۲، ۵۰ و ۲۰ سال به‌ترتیب ۱۲۲، ۲۶۶ و ۳۲۹ هکتار از زمین‌های پیرامون رود به زیر آب خواهد رفت. سرانجام پیشنهاد دادند که بر اساس پهنه‌بندی سیلاب رود نوران‌چای اقدام‌هایی همچون آسیب وارد نکردن به حریم رود، جلوگیری از تغییر کاربری زمین‌ها به کاربری مسکونی و زهکشی مناسب آب رود بر اساس پهنه سیلابی انجام شود.

در برزیل، سیلوا و همکاران (۲۰۱۴) پهنه‌بندی سیل رود سدروس را با بهره‌گیری از GIS و مدل HEC-RAS انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که جاده‌ها و ساختمان‌های پیرامون پل و بالادست رود بیشتر در معرض سیل بودند. همچنین، این پژوهشگران گزارش کردند که ظرفیت و حساسیت استفاده

مواد و روش‌ها منطقه مطالعه شده

رود تلار از بخش‌های شمالی رشته کوه‌های البرز سرچشمه می‌گیرد و طولی در حدود ۱۵۲ کیلومتر دارد و پهنه آبخیز آن ۲۹۰۰ کیلومتر مربع و میانگین بلندی آبخیز ۲۱۲۰ متر است. میانگین سالانه بارندگی این آبخیز ۷۲۹ میلی‌متر است. شیب بستر رود تا شیرگاه نسبتاً تند و حدود ۴٪ است و پس از آن رود با شیب ملایم حدود یک درصد به سوی دریا پیش می‌رود. وضعیت آبخیز این رود برفی- بارانی است و آب‌دهی رود در ورودی به سوی دشت قابل توجه است. آب‌دهی سالانه آن در یک دوره ۳۲ ساله به‌طور میانگین ۱۱۸ میلیون مترمکعب است (اسدی و همکاران ۲۰۱۷). منطقه مطالعه شده در این پژوهش پهنه‌ای با وسعت ۱۰ کیلومتر (نقطه ابتدا با مختصات یو تی ام ۶۶۲۲۴۹ و ۴۰۴۷۴۳۲ تا نقطه انتها با مختصات یو تی ام ۴۰۵۲۴۶۴ و ۶۵۸۳۰۶) از رود تلار مازندران در محدوده شهر کیاکلا (در غرب شهر کیاکلا) است که در سیل ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ طغیان آب رود تلار وارد شهر کیاکلا شد و خسارت‌های جانی و مالی سنگینی را به دنبال داشت (شکل ۱).

و تأثیر تغییر شرایط مرزی بالادست را بر پهنه سیل بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی از DEM منطقه با وضوح ۱۲/۵ متر با داده‌های اعتبارسنجی و گزارش‌های موجود از منطقه سیل‌خیز مطابقت خوبی داشت.

بر اساس نتایج این پژوهش‌ها، می‌توان گفت که برای شبیه‌سازی سیلاب در رودها نرم‌افزار HEC-RAS کاربردی و مناسب است و می‌توان از آن برای شبیه‌سازی سیل استفاده کرد و نقش هر یک از عامل‌ها در طغیان رود را تعیین کرد. البته تاکنون در کشور هیچ پژوهشی در این زمینه انجام نشده است. شبیه‌سازی‌های آب‌شناسی جریان سیل در رود تلار از بالادست شهر کیاکلا تا بعد از شهر، این امکان را فراهم کرد تا عامل‌های بروز آب‌گرفتگی شهر کیاکلا در اسفند ۱۳۹۷ شناسایی شود تا بتوان از تکرار چنین پیشامدی جلوگیری کرد. هدف این پژوهش شبیه‌سازی آب‌نمود رخداد سیل ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ رود تلار در محدوده شهر کیاکلا با مدل رایانه‌ای HEC-RAS و تعیین نقش عامل‌های مؤثر در بروز سیلاب در منطقه مطالعه شده و پیشنهاد راهکارهای اجرایی برای جلوگیری از بروز آب‌گرفتگی زمین‌های مجاور رود تلار در محدوده شهر کیاکلا استان مازندران بود.



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعه شده از رود تلار در تصویر گوگل ارث.

Fig 1- Location of Telar River study area in google earth image.

داده‌های لازم

برابر بند (ح) ماده (۱) آئین‌نامهٔ مربوط به بستر و حریم رودها، نهرها، مسیل‌ها، مرداب‌ها برکه‌های طبیعی و شبکه‌های آبرسانی، آبیاری و زهکشی، بستر آن بخشی از رود، نهر یا مسیل است که در هر محل با توجه به آمار آب‌شناختی و داغاب و بیشترین طغیان با دورهٔ بازگشت ۲۵ ساله به وسیلهٔ وزارت نیرو یا شرکت‌های آب‌منطقه‌ای تعیین شود.

برای تعیین حد نهایی بستر و حریم کمی رود در دو ساحل راست و چپ آن، نیاز است تا سیلاب با دورهٔ بازگشت ۲۵ ساله برآورد شود. با این هدف از آمار ۶۵ ساله بده رود در ایستگاه آب‌سنجی کیاکلا که در بالادست پل نجارکلا بود، استفاده شد. داده‌های مدل رقومی ارتفاع و فاصلهٔ نقاط روی مقاطع عرضی با استفاده از دوربین نقشه‌برداری تئودولیت و همچنین جی‌پی‌اس چند بسامد برداشت شد. دلیل استفاده از جی‌پی‌اس چند بسامد، نبودن امکان نقشه‌برداری پیوسته با استفاده از تئودولیت میان مقاطع متوالی به دلیل وجود موانع زیاد و صعب‌العبور بودن آن بخش از رود بود و به ناچار برای ادامه کار از مسیر دیگری وارد رود شده و مقاطع بعدی برداشت شدند. در این پژوهش ۲۶ مقطع عرضی از مسیر مطالعه‌شده برداشت شد. داده‌های مربوط به بلندی هر نقطه بر اساس بلندی نشانک فرضی محاسبه و در مدل وارد شد. فاصلهٔ مقاطع عرضی متوالی در ساحل چپ، ساحل راست و خط مرکزی رود اندازه‌گیری و در مدل وارد شد. با توجه به وجود سه پل نجارکلا، ملاکلا و برج‌خیل روی رود در مسیر مطالعه‌شده، مشخصات هندسی پل شامل ضخامت عرشه، عرض، طول، پایه‌ها، گوشواره‌های دو طرف در بالادست و پائین‌دست اندازه‌گیری و وارد مدل شدند. برای هر پل، یک مقطع عرضی زیر پل و دو مقطع در بالادست و دو مقطع در پائین‌دست، برای شبیه‌سازی جریان نزدیک‌شونده قبل از پل و جریان دورشونده بعد از پل در نظر گرفته شد و داده‌های مربوط به بلندی نقاط و فاصله‌های میان آنها روی مقاطع عرضی با دوربین نقشه‌برداری تئودولیت برداشت شد. ضریب زبری مانینگ برای بستر، سواحل راست و چپ در مقاطع گوناگون، بر اساس اندازه‌گیری و بازدید میدانی و جدول‌های مربوطه انتخاب و در مدل وارد شدند. در این پژوهش برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل HEC-RAS و همچنین شبیه‌سازی سیلاب ۲۷ اسفند ۱۳۹۷، از اندازه‌گیری‌های میدانی و آبنمود لحظه‌ای سیل با گام‌های زمانی یک ساعته در ایستگاه آب‌سنجی کیاکلا، استفاده شد.

شبیه‌سازی آب‌سنجی جریان آب در رود با مدل HEC-RAS

برای مدل‌سازی جریان سیل در رود تلار، تمام داده‌های مربوط به بلندی و فاصله‌های مربوط به ۲۶ مقطع عرضی،

فاصله‌های سواحل راست و چپ و همچنین خط مرکزی میان مقاطع در محل مربوطه، وارد نرم افزار شدند. مشخصات هندسی هر سه پل نجارکلا، ملاکلا و برج‌خیل و نیز ضریب زبری مانینگ دیوارهٔ راست و چپ رود مربوط به هر مقطع وارد نرم افزار شدند. با وارد کردن بده جریان عبوری از رود یا آبنمود جریان در ابتدای بازهٔ مطالعه‌شده، شبیه‌سازی انجام شد و خروجی‌های مدل به شکل جدول و نمودار قابل مشاهده، ذخیره و چاپ بودند.

واسنجی مدل در حقیقت بررسی درستی نتایج خروجی مدل به ازای شرایط بازهٔ مطالعه‌شده رود است و به دلیل وجود خطا در سنج‌های برآوردی مانند ضریب زبری، قبل از شبیه‌سازی آب‌سنجی جریان در رود، نیاز بود تا انجام شود. برای این کار از داده‌های منحنی بده-اشل ایستگاه آب سنجی کیاکلا در مجاورت بازهٔ مطالعه‌شده استفاده شد.

ضریب کارایی نش-ساتکلیف (رابطه ۱) از معیارهای بسیار شناخته‌شده در پژوهش‌های آب‌شناختی برای ارزیابی کارآمدی یک مدل است. ضریب کارایی نش-ساتکلیف، اندازهٔ تفاوت میان اندازه‌های مشاهده‌ای و اندازه‌های پیش‌بینی شده است که به شکل اندازه‌های مربع بیان می‌شود. اگر اندازهٔ ضریب نش-ساتکلیف برابر با یک باشد، تناسب کاملی میان داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده وجود دارد. اندازهٔ صفر این ضریب نشان می‌دهد که مدل، نسبت به استفاده از اندازه‌های میانگین داده‌های مشاهده‌ای بهتر یا بدتر پیش‌بینی نمی‌کند. اگر ضریب بزرگتر از ۰/۷۵ باشد نتایج شبیه‌سازی خوب توصیف می‌شوند، اما زمانی که اندازه‌ها میان ۰/۳۶ و ۰/۷۵ است نتایج مدل رضایت‌بخش به‌شمار می‌رود (اینکل و همکاران ۲۰۰۷). در این پژوهش از این ضریب برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده شد.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (d_i^{sim} - d_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (d_i^{obs} - d_i^{av})^2} \quad (1)$$

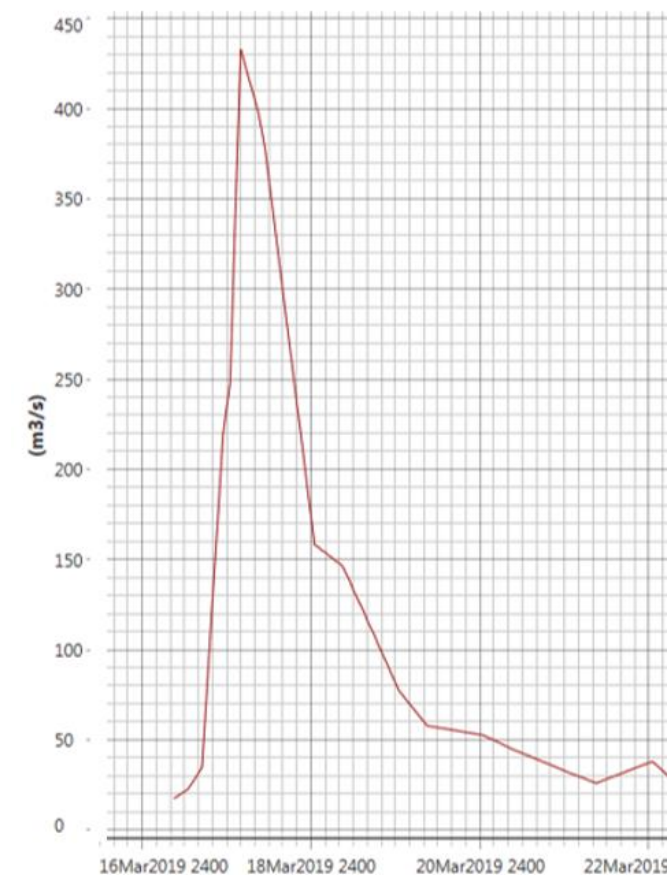
d_i^{obs} : داده‌های مشاهده‌ای ژرفای آب، d_i^{sim} : داده‌های شبیه‌سازی‌شده ژرفای آب، d_i^{av} : میانگین داده‌های مشاهده‌ای ژرفای آب، و n : تعداد داده‌ها است.

بستر رود در بازهٔ مطالعه‌شده، پس از شبیه‌سازی آب‌سنجی با بده با دورهٔ بازگشت ۲۵ ساله تعیین شد. حریم نهرهای طبیعی یا رودها با آب همیشگی یا فصلی، از یک تا ۲۰ متر بود که در این پژوهش، با روش $DLRS^1$ که در دستورالعمل تعیین حریم کمی رودها آمده است، تعیین شد (معاونت حفاظت و بهره‌برداری، دفتر مهندسی رودها و سواحل ۲۰۱۰). در این روش از شاخص‌های بده ۲۵ ساله، مکان، پایداری بستر و کناره، وضعیت جریان و تنش اجتماعی استفاده شد.

نتایج و بحث

گروه زمانی داده‌های بیشینه بده لحظه‌ای ۶۵ ساله ایستگاه آب‌سنجی کیاکلا با آزمون ران تست بررسی و تصادفی بودن آنها تأیید شد. پس از تأیید گروه داده‌های آب‌سنجی، تحلیل توزیع فراوانی این داده‌ها با نرم‌افزار ایزیفیت انجام شد. دوره

بازگشت بیشینه بده لحظه‌ای سیلاب ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ (۴۳۳ متر مکعب بر ثانیه)، برابر ۲۴ سال به‌دست آمد. داده‌های سیلاب رود به‌شکل دو ستون زمان و بده لحظه‌ای وارد مدل شد که خروجی آن از مدل به‌شکل نمودار در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- آب‌نمود سیل ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ به‌شکل خروجی مدل HEC-RAS.

Fig 2-Flood hydrograph as an output of HEC-RAS Model on 18 March 2019.

نش-ساتکلیف مربوطه محاسبه شد. از آنجایی که دقیق‌ترین ضریب زبری برآوردی، در بیشترین ضریب نش-ساتکلیف به‌دست می‌آید، در جدول ۱ برای دو رخداد ۰/۸۳ و ۰/۷۸ و قابل‌قبول بود. میانگین اندازه‌های ضریب زبری به‌دست آمده از واسنجی دو رخداد، برای اعتبارسنجی رخداد دیگر استفاده شد که اندازه ضریب نش-ساتکلیف آن برابر ۰/۷۶ به‌دست آمد. این موضوع نشان‌دهنده این بود که مدل شکل واقعی آب‌نمود را به‌درستی شبیه‌سازی کرده است. پس از واسنجی و اعتبارسنجی، شبیه‌سازی آب‌سنجی جریان در رود برای بده‌ها و آب‌نمودهای گوناگون انجام شد.

پس از وارد کردن داده‌های مربوط به بلندی مقاطع گوناگون، مشخصات هندسی سه پل مزبور در بازه مطالعه‌شده، بده جریان عبوری از رود و همچنین انتخاب گزینه‌های موجود در مدل امکان شبیه‌سازی آب‌سنجی جریان آب در رود وجود داشت اما، قبل از آن نیاز بود تا واسنجی و اعتبارسنجی مدل انجام شود. با توجه به تغییرات ضریب زبری مانینگ، واسنجی برای دو رخداد ۱۳۹۷/۱۰/۲۸ و ۱۳۹۸/۰۸/۱۲ و اعتبارسنجی برای یک رخداد سیل ۱۳۹۹/۰۱/۰۴ انجام شد. شبیه‌سازی آب‌سنجی بازه مطالعه‌شده با هر آب‌نمود سیل و با ضریب زبری‌های گوناگون به‌شکل جداگانه انجام شد. ژرفای آب به‌دست آمده از شبیه‌سازی با اندازه به‌دست آمده از منحنی بده - اشل مقایسه شد و ضریب

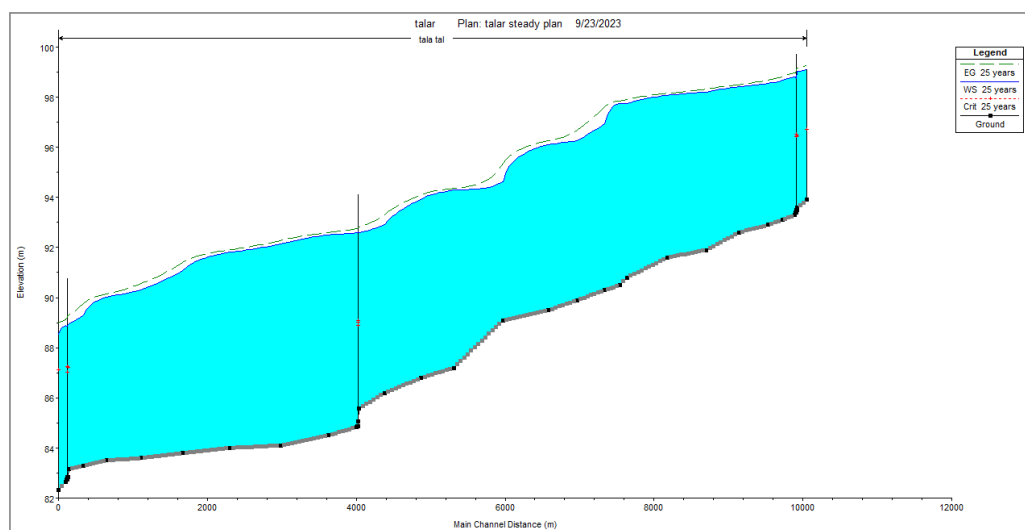
جدول ۱- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای ژرفای آب در ایستگاه کیاکلا.

Table1 -Results of model calibration and vldation for water depth in Kiakola Station.

Row	Process	Variable	Event	Nash-Sutcliffe Co.
1	Calibration	Water Depth	01/18/2019	0.83
2	Calibration	Water Depth	11/03/2019	0.78
3	Validation	Water Depth	03/23/2020	0.76

بازگشت آن ۲۴ سال برآورد شد. برای پی بردن به دلایل های آب گرفتگی شهر کیاکلا و طغیان رود تالار در مجاورت این شهر، شبیه سازی آب نمود این رخداد انجام شد. نیم رخ طولی تراز سطح آب بازه مطالعه شده پس از شبیه سازی آب نمود سیل ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ در شکل ۳ نشان داده شده است.

سیلاب و آب گرفتگی ناشی از طغیان رود تالار در محدوده شهر کیاکلا و روستاهای پیرامون در ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ خسارت های زیادی را به همراه داشت. بر اساس آب نمود لحظه ای دریافتی از شرکت سهامی آب منطقه ای مازندران، بده اوج این رخداد ۴۳۳ متر مکعب بر ثانیه بود و بر اساس تحلیل آماری روی داده های تاریخی بده رود تالار در ایستگاه آب سنجی کیاکلا، دوره

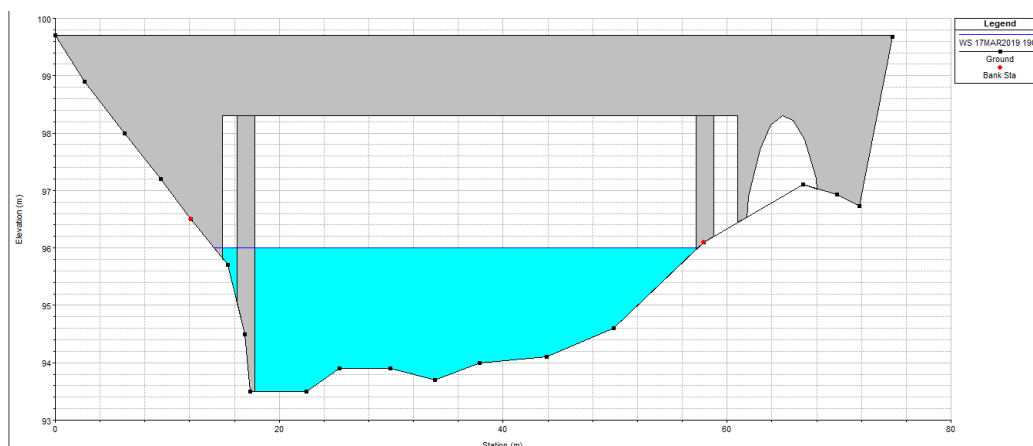


شکل ۳- نیم رخ طولی تراز سطح آب پس از شبیه سازی آب نمود سیل ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ در بازه مطالعه شده.

Fig 3- Longitudinal water surface level after simulation of 18 March 2019 flood hydrograph in study area.

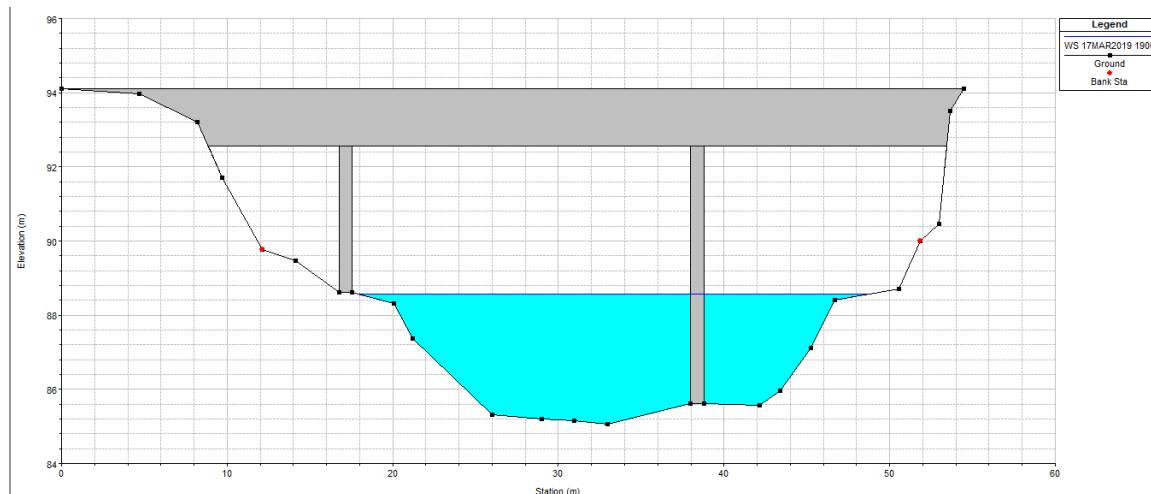
به سمت پائین دست به ترتیب پل نجارکلا، پل ملاکلا و پل برج خیل در شکل های ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است.

بیشترین تراز سطح آب پس از شبیه سازی آب نمود سیل ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ در زیر سه پل مزبور در بازه مطالعه شده از بالادست



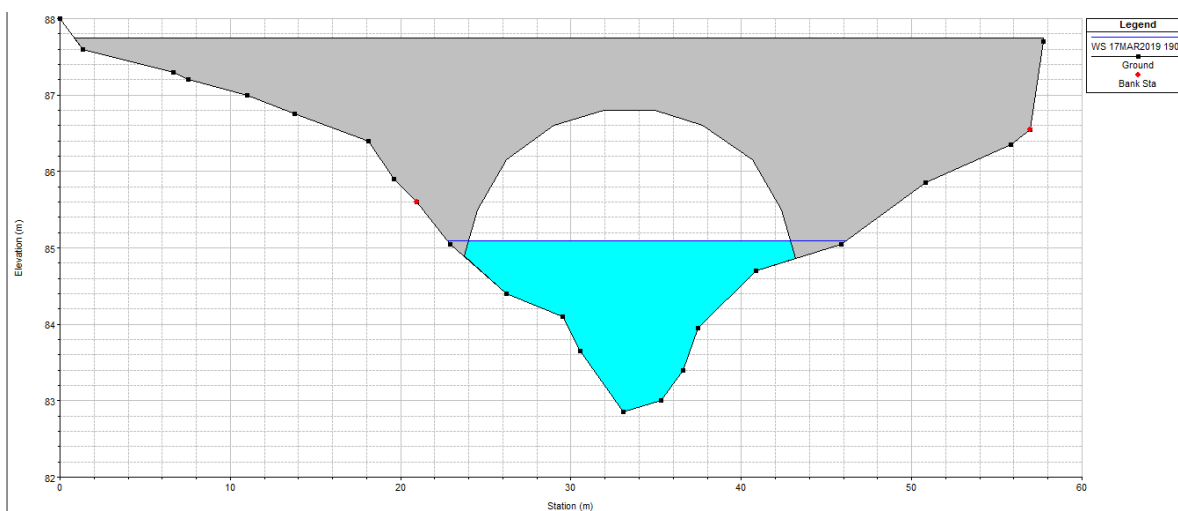
شکل ۴- شبیه سازی آب نمود سیل ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ و بیشینه تراز سطح آب در زیر پل نجارکلا.

Fig 4- Simulation of 18 March 2019 flood hydrograph and the maximum water level under the Najarkola Bridge.



شکل ۵- شبیه‌سازی آب‌نمود سیل ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ و بیشینه تراز سطح آب در زیر پل ملاکلا.

Fig 5- Simulation of 18 March 2019 flood hydrograph and the maximum water level under the Mollakola Bridge.



شکل ۶- شبیه‌سازی آب‌نمود سیل ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ و بیشینه تراز سطح آب در زیر پل برج‌خیل.

Fig 6- Simulation of 18 March 2019 flood hydrograph and the maximum water level under the Borjkheil Bridge.

آب به زمین‌های پیرامون شد که سرانجام موجب آب‌گرفتگی سطح شهر و روستاهای مجاور رود شد. تصویر پل برج‌خیل در زمان بروز سیل در شکل ۷ نشان‌داده شده است. وجود شاخه و تنه درختان در بالادست پل و طغیان رود و ورود آب به داخل زمین‌های مجاور در این شکل کاملاً مشهود است. فردی در حال عبور از روی پل با قایق نیز قابل مشاهده است.

بر پایه شکل‌های ۴، ۵ و ۶ در هیچ یک از پل‌ها سطح آب به زیر عرشه نرسید و به زمین‌های پیرامون جریان رود سرریز نشد. بررسی تصویرهای گوگل ارث، اطلاعات دریافتی از مردم محلی، بازدیدهای میدانی و عکس و فیلم‌های تهیه‌شده در زمان رخداد سیل، نشان داد که گرفتگی و انسداد پل‌های ملاکلا و برج‌خیل به‌وسیله شاخ و برگ و تنه درختان رخ داد و این پیشامد سبب بالا آمدن تراز سطح آب رود در بالادست و سرریز شدن جریان



شکل ۷- تصویر پل برج‌خیل در زمان بروز سیل.

Fig 7- A photo of Borjkhel Bridge at Flood Time.

ساله ایستگاه آب‌سنجی کیاکلا برابر ۴۳۸ مترمکعب بر ساعت به‌دست آمد. شبیه‌سازی آب‌نمود سیلاب ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ روی بازه مطالعه‌شده رود تلار با شرایط کنونی نشان داد که تمام مقاطع رود و هر سه پل ظرفیت کافی برای عبور جریان را داشتند. همچنین، شبیه‌سازی سیلاب ۲۷ اسفند ۹۷ و مشخصات هندسی پل برج‌خیل در آن زمان نیز عبور آزاد جریان از زیر هر سه پل را نشان داد. بر اساس طغیان نکردن رود با بده‌های بیشتر در گذشته، برداشت نشدن شن و ماسه در بازه مطالعه‌شده، آسیب نزدن به بستر رود، ظرفیت عبوردهی سیلاب با دوره بازگشت‌های بیشتر برای هر سه پل مزبور در بازه مطالعه‌شده، مشخص شد که آب‌گرفتگی شهر کیاکلا و روستاهای پیرامون به‌دلیل نامناسب بودن ابعاد هندسی پل نبود، بلکه به‌دلیل گرفتگی دهانه پل با تنه و سرشاخه‌های درختان حمل‌شده از بالادست آبخیز به محل پل بود که این یافته نیز همانند شمار قابل توجهی از بلاهای طبیعی تأییدکننده بی‌توجهی و اهمیت ندادن به عملیات آبخیزداری و مدیریت بهره‌برداری جنگل در آبخیزهای منابع طبیعی بالادست است. بررسی تصویرهای ماهواره ای گوگل ارث به‌خوبی نشان داد که به بخش بزرگی از نوار حریم ۲۰ متری دو طرف رود با کاشت درختان مثمر، آسیب وارد شد که البته هیچ تأثیری در بروز آب‌گرفتگی و خسارت‌های سیلاب ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ نداشت. جلوگیری از تغییر کاربری زمین‌های جنگلی و مرتعی در آبخیزهای کوهستانی و ساخت سازه‌های تقاطعی جمع‌آوری‌کننده اجسام شناور و غوطه‌ور در آب در آبخیزهای بالادست، اقدام‌هایی هستند که احتمال تکرار چنین پیشامدهایی را به حداقل ممکن می‌رسانند.

شبیه‌سازی آب نمود سیل ۲۷ اسفند ۱۳۹۷، نشان داد که در تمام مقاطع رود، سرریز جریانی وجود نداشت و رود ظرفیت کافی برای عبور جریان سیلابی را داشت. با بررسی آمار ۶۵ ساله بده در ایستگاه آب‌سنجی کیاکلا (در مجاورت بازه مطالعه‌شده) مشخص شد که در گذشته سیلاب‌ها با دوره بازگشت‌های بیشتر رخ داده است اما، رود طغیان نکرده است. همچنین، در پیمایش مسیر در زمان نقشه‌برداری، برداشت شن و ماسه مشاهده نشد. بنابراین، دلیل طغیان رود تلار و آب‌گرفتگی شهر کیاکلا و چند روستای مجاور، انسداد دهانه پل با تنه و شاخه درختان بود. با توجه به سرریز نشدن جریان از بستر فعال رود در شبیه‌سازی آب‌سنجی با بده با دوره بازگشت ۲۵ سال، بستر رود همان بستر جریانی بود و هیچ آسیبی به بستر رود نیز رخ نداد. اندازه حریم کمی محاسبه شده در بازه مطالعه‌شده رود با استفاده از روش DLSRS، برابر ۲۷ متر به‌دست آمد که با در نظر گرفتن اندازه بیشینه، حریم بازه مطالعه‌شده از هر طرف ۲۰ متر بود. از سوی دیگر، به‌وسیله مجاورین رود تقریباً در هر دو طرف طول بازه مطالعه‌شده به‌شکل کامل، درختان مثمر کاشت شده بود که غیر قانونی است، اما تأثیری بر سیل ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ نداشته است. زیرا جریان آبی از آبراهه اصلی و سیلاب دشت‌های چپ و راست رخ نداده است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، تحلیل توزیع فراوانی با نرم افزار ایزیفیت روی داده‌های تاریخی بده ایستگاه آب‌سنجی کیاکلا نشان داد که دوره بازگشت اوج سیلاب لحظه‌ای ۲۷ اسفند ۱۳۹۷ برابر ۲۴ سال بود. همچنین، سیلاب با دوره بازگشت ۲۵

فهرست منابع

- Akhavan, AH, and Azizian, A. 2021. Performance evaluation of topographical- based HAND in the estimation flood. Inundation Journal of Hydraulics. 16(163): 85-103. (In Persian).
- Al-Hussein AAM, Khan S, Ncibi K, Hamdi, N, and Hamed Y. 2022. Flood analysis using HEC-RAS and HEC-HMS: A case study of khazir (Middle East- Northern Iraq), Water, 14: 3779(22): 1-19.
- Asadi F, Fazl Ola R, Emadi A. 2017. Investigation of the river bed changes using HEC-RAS4.0 model case study: Talar River. Journal of Watershed Management Research. 8(15): 25-35.
- Bhandari M, Nyaupane N, Mote SR, Kalra A, Ahmad S. 2017. 2D unsteady routing and flood inundation mapping for lower region of Brazes River Watershed. World environmental and water resources Congress, Sacramento, California: pp. 292-303.
- Bureau of River and Shore engineering, Deputy of Conservation and Operation. 2010. Instructions for determination of quantitative limits of river, 15 p. (In Persian).
- Damadi S, Dehvari A, and Dahmardeh Ghalelano MR. 2021. Flood hazard zonation using HEC-RAS hydraulic model in Sarbaz River, Siستان and Baluchestan Province. Watershed Engineering and Management, 13(3): 590-601. (In Persian).
- Demir V, and Kisi O. 2016. Flood Hazard mapping by using geographic information system and hydraulic model: Mert River, Samsun, turkey. Advances in Meteorology, 2677. 1-9. DOI:10.1155/2016/4891015
- Engel B, Storm D, White M, Arnold JM, Arabi. 2007. A hydrologic/water quality model application protocol. American Water Resources Association, 43(5):1223- 1236.
- Esfandiari Daraad F, Nezafat Taklreh B, and Paseban A. H. 2022. Morphological simulation of flood occurrence in Noorchai River using Hec-Ras hydraulic model. Environmental Erosion Research Journal, 12(3): 190-210. (In Persian).
- Ezzine A, Saidi S, Hermassi T, Kammessi I, Darragi F. and Rajhi H. 2020. Flood mapping using hydraulic modeling and Sentinel-1 image: Case study of Medjerda Basin, northern Tunisia. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 23 (3): 303-310.
- Ghasabian, J. 2019. Utilizing new methods in crisis management and urban flooding with emphasis on reducing damage and casualties (Case study: Simorgh City flood). Journal of New Research Approaches in Management and Accounting, 4(28): 61-73. (In Persian).
- Hejazi A, Khodaie Gheshlagh F, and Khodaie Gheshlagh L. 2019. Zoning the villages at flood risk in the Varkesh-Chai Drainage Basin by GIS and Hec - Ras software and Hec-Geo-Ras extension. Journal of Geographical Sciences, 19(53): 137-155. (In Persian).
- Kardan N, Hasanzadeh Y, Arzanloo A. 2018. 2D Numerical Simulation of urban floods by CCHE2D (Case study: Aghghala City), Iranian Journal of Marine Technology, 4(10): 25-36. (In Persian).
- Khattak MS, Anwar F, Usman Saeed T, Sharif M, Sheraz K. Ahmad A. 2016. Floodplain mapping using HEC-RAS and ArcGIS: A case study of Kabul River, Research Article- Civil engineering, pp. 1375-1390.

- Panahi R, Hoseinzadeh M.M, Khalehi S. 2019. Flood risk zonation in order to determine river flood fringe (Case study: Gamasiyab River). Iranian Journal of Eco-hydrology, 6(2): 553-567. (In Persian).
- Rad M, Vafakhah MM, Gholamalifard M. 2018. Flood mapping using HEC-RAS hydraulic model in part of Khorramabad watershed. Journal of Natural Environmental Hazards, 7(16): 211-225. (In Persian).
- Roshun H, Vahazadeh G, Solaimani K, Farhadi R. 2013. Simulation of river hydraulics behavior using Hec-Ras model in GIS environment (Case study: Beshahr River, Kohgiluyeh and Boyerahmad Province). Journal of Watershed Management Research, 4(7): 70-84. (In Persian).
- Shahirparsa A, Noori M, Rashidi M. 2016. Flood plain zoning simulation by using hec-ras and cche2d models in the Sungai Maka River. Air, Soil and water Research, 9(9): 55-62. DOI:10.4137/ASWR.S36089
- Silva FV, Bonuma NB, Uda PK. 2014. Flood mapping in urban area using HEC- RAS model supported by GIS, 6th International conference on flood management, Sao Paulo, Brazil. 9 p.
- Vashist K, Singh KK. 2023. HEC-RAS 2D modeling for flood inundation mapping: a case study of the Krishna River Basin. Water Practice and Technology, 18 (4): 831-844.



Fars Agricultural and Natural Resources
Research and Education Center



Agricultural Research, Education
and Extension Organization

Investigation of Effective Factors Role on 18 March 2019 Floods of the Kiakola in Mazandaran Province by HEC-RAS Model

Valiollah Karimi^{*1}, Mohammad Ali Hadian Amri²

- 1- Assistant Professor of Soil Conservation and Watershed Management Department, Mazandaran Agriculture and Natural Resources research and Education Center, AREEO, Sari, Iran
- 2- Assistant Professor of Soil Conservation and Watershed Management Department, Mazandaran Agriculture and Natural Resources research and Education Center, AREEO, Sari, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Heavy rainfall events in short terms makes a plenty of precipitation volume that commonly causes severe problems in human community, flora and fauna. The Simorgh city was damaged financially by the floods on March 18, 2019. Hydraulic simulation from upstream to downstream of the Kiakola town causes to find the inundation factors and prevent to repeat of such events. Purpose of this research is a simulation of 18 March 2019 floods in the Telar River in Kiakola town of HEC-RAS model and determining effective factor's role in this flood event to present some countermeasures for preventing of happening such inundation in this region.

Materials and Methods

In this research, 10 km of the Telar River in the west of Simorgh city was studied. In this area, there were bridges, Najjarkola, Mollakola and Borjkheil, all of their geometric dimensions of bridges with geographic coordinates, see level elevations and distances of 26 cross sections which surveyed by theodolite and GPS multi frequency device. The hydrograph of the Telar River was simulated by the HEC-RAS Model in 18 March 2019. To obtain the return period of 18 March 2019 flood, 65 years' time series of the Telar River discharge in the Kiakola Hydrometric station was analyzed by EasyFit. The river bed was determined by 25 years return period flood and river limits was determined by DLSRS method which mentioned in determination of quantitative limits of river instruction.

Article Type: Research Article

*Corresponding Author E-mail: Vkarimi80@gmail.com

Citation: Karimi, V., Hadian Amri, M.A. 2024. Investigation of Effective Factors Role on 18 March 2019 Floods of Kiakola in Mazandaran Province by HEC-RAS Model. Watershed Management Research. 37(4): 2-14.

DOI:10.22092/WMRJ.2024.364406.1564

Received: 19 December 2024, **Received in revised form:** 14 January 2024, **Accepted:** 18 March 2024

Published online: 01 January 2025

Watershed Management Research, VOL. 37, No.4, Ser. No:145, Winter 2025, pp. 2-14.

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



Results and Discussion

Frequency distribution analysis was done by EasyFit software on historical discharge of the Kiakola hydrometric station showed that return period of peak discharge on 18 March 2019 hydrograph was equal to 24 years. Simulation of 18 March 2019 hydrograph on study reach indicated that all cross sections of the river and all three bridges had enough capacity to pass the flow and no damage was done to the river bed in the studied path, but a large part of the 20 m privacy strip of two the side of the river was damaged by planting fruitful trees, which, of course, had no effect on the occurrence of flooding caused by the flood of 18 March 2019 in Simorgh city.

Conclusion and Suggestions

The flooding of the city of Kiakola and the surrounding villages was not due to the inappropriate geometric dimensions of the bridge, but because the opening of the bridge was blocked with the trunks and branches of trees transported from the upstream of the watershed to the bridge site, which, like a significant number of natural disasters, confirms neglect. It is related to watershed operations in watersheds of natural resources. Preventing the change of use of forest and rangeland in mountain watersheds and building crossing structures to collect floating and submerged bodies in upstream watersheds are measures that minimize the possibility of repeating such consequences.

Keywords: Flood discharge, flood simulation, HEC-RAS, inundation

بررسی و شناسایی سنگفرش های بیابانی در شهرستان سمنان با استفاده از تصویرهای سنجنده⁺ ETM

حریر سهرابی^۱، هاید آرآ^{۲*}، محمدکیا کیانیان^۳، امین صالح پورجم^۴

- ۱ - کارشناس ارشد گروه بیابان زدایی دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
- ۲ - استادیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
- ۳ - استادیار گروه بیابان زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
- ۴ - دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

فرآیند شناسایی شکل های زمین موضوعی است، که به وسیله بسیاری از پژوهشگران بررسی شده است. تمام تعریف های زمین ریخت شناختی مبتنی بر مطالعه و شناسایی شکل های زمین است. شناخت شکل های زمین و نحوه پراکنش آنها از نیازهای اساسی علم زمین ریخت شناختی کاربردی و دیگر علوم محیطی است. در این راستا، فناوری سنجش از دور به دلیل تولید تصویرهای ماهواره ای با وضوح زیاد فضایی و طیفی، می تواند ابزار ارزشمندی برای شناسایی و طبقه بندی شکل های زمین باشد. سنگ فرش بیابان، یکی از مهم ترین شکل زمین های مناطق خشک و بیابانی است. تهیه نقشه سنگ فرش ها و انواع آنها، مبنایی برای ارزیابی منطقه از نظر ساختاری و ویژگی های زمین ریخت شناختی فراهم می آورد، که در زمینه بسیاری از مسائل مدیریت و برنامه ریزی محیطی سودمند است و می تواند به عنوان الگویی برای مناطق مشابه به کار رود. در این پژوهش، با استفاده از داده های سنجنده⁺ ETM و بر اساس معیارهای مدنظر، شناسایی و طبقه بندی ویژگی های سنگ فرش های بیابانی شهرستان سمنان انجام شد.

مواد و روش ها

منطقه مطالعه شده با مساحت ۴۷۶۴۵/۹۸ هکتار، در شهرستان سمنان است. منطقه دارای مختصات جغرافیایی ۵۳°۲۸' تا ۵۳°۴۳' طول شرقی و ۳۵°۲۰' تا ۳۵°۴۰' عرض شمالی است. هدف این پژوهش بررسی، جداسازی و شناسایی طبقات سنگ فرش بیابانی به عنوان نوعی از شکل زمین های بیابانی با استفاده از روش سنجش از دور و تصویرهای ماهواره ای

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ara338@semnan.ac.ir

استناد: سهرابی، ح، آرآ، ه، کیانیان، م. ک، صالح پورجم، ا. ۱۴۰۴. بررسی و شناسایی سنگفرش های بیابانی در شهرستان سمنان با استفاده از تصویرهای سنجنده⁺ ETM. پژوهش های آبخیزداری، ۳۷ (۴): ۱۵-۳۳.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2024.365469.1581

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲
پژوهش های آبخیزداری، سال ۱۴۰۳، دوره ۳۷، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۴۵، زمستان ۱۴۰۳، صفحه های ۱۵ تا ۳۳.

© نویسندگان

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



لندست ETM^+ در جنوب سمنان بود. از این رو، با بررسی میدانی و نمونه‌برداری از محدوده مطالعه‌شده، درصد تراکم پوشش سنگفرش بیابانی اندازه‌گیری و موقعیت هر نمونه با GPS ثبت شد. برای طبقه‌بندی سنگفرش‌های بیابانی در محیط‌های نرم‌افزار Envi 4.5 و IDRISI Selva، از ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی، نقشه زاویه طیفی، واگرایی اطلاعات طیفی و آرت‌مپ فازی استفاده شد. سپس، صحت هر طبقه‌بندی، با استفاده از ضریب‌های صحت کامل، کاپا، صحت کاربر و صحت تولیدکننده با نمونه‌های تعلیمی مقایسه شد. سرانجام، نقشه پهنه‌بندی مکانی هر روش در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.2 رسم شد.

نتایج و بحث

در این پژوهش، بهترین ترکیب نواری برای تشخیص و جداسازی سنگفرش‌های بیابانی جنوب سمنان، ترکیب باند ۳-۴-۶ عامل شاخص مطلوب ۷۱/۴۵ (OIF) بود، که در نوار مادون قرمز و مرئی میانی (VNIR + TIR) بود. بر اساس ضریب کاپا، روش‌های ماشین بردار پشتیبان (۸۵/۰۵)، آرت‌مپ فازی (۸۱/۴۴)، شبکه عصبی (۵۵/۱۷)، نقشه زاویه طیفی (۵۳/۸۹) و واگرایی اطلاعات طیفی (۵۰/۲۲)، به ترتیب بیشترین توانایی را در جداسازی طیفی طبقات گوناگون سنگفرش بیابان جنوب سمنان داشتند. روش‌های طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان و آرت‌مپ فازی، به ترتیب بیشترین ضریب‌های کاپا برای طبقات را کسب کردند و کمترین ضریب‌های کاپا و صحت کامل نیز، به ترتیب در روش‌های شبکه عصبی، نقشه زاویه طیفی و واگرایی اطلاعات طیفی بود. با توجه به اینکه طبقات، باندها و دیگر شرایط استفاده‌شده برای تمام روش‌ها یکسان بود، از این رو، اختلاف موجود در صحت، فقط به دستورالعمل‌های محاسبه‌ای روش‌ها بستگی داشت.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

فناوری سنجش از دور به دلیل تولید تصویرهای ماهواره‌ای با وضوح زیاد فضایی و طیفی، می‌تواند ابزار ارزشمندی برای شناسایی و طبقه‌بندی شکل‌های زمین باشد. تهیه نقشه سنگفرش‌های بیابانی و انواع آنها، مبنایی برای ارزیابی منطقه از نظر ویژگی‌های ساختاری و زمین‌ریخت‌شناختی است، که می‌تواند در زمینه بسیاری از مسائل مدیریت و برنامه‌ریزی محیطی سودمند باشد. از این رو پیشنهاد می‌شود، از دیگر روش‌های طبقه‌بندی مبتنی بر برشی‌گرابودن، روش‌های ترکیبی، فرکانس پوششی، تصویرهای سنجنده‌های با قدرت جداسازی مکانی و طیفی بهتر و لحاظ کردن خصوصیات همچون قطر ذرات استفاده شود، تا در تهیه نقشه‌های طبقات سنگفرش بیابانی اثربخش باشد.

واژگان کلیدی: آرت‌مپ فازی، سنجنده ETM^+ ، سنگفرش بیابان، سمنان، ماشین بردار پشتیبان

مقدمه

سنگریزه است، که از عنصرهای آبرفتی و کوهرفتی تشکیل شده است. قطر عنصرها تا ۱۰ سانتی‌متر هم می‌باشد، باد عنصرهای ریز را با خود حمل می‌کند و عنصرهای درشت را که قادر به حمل آن نیست، بر جای می‌گذارد و مانند یک محافظ، خاک را در برابر فرسایش بادی حفظ می‌کند.

ب: رخساره سنگفرش دانه ریز

این رخساره با عنصرهای ریز که شامل قلوه سنگ، شن درشت و شن ریز است، قابل تشخیص است. البته هرزآب‌ها و رواناب‌های مناطق بیابانی با هر جریان، مواد ریز را رسوب داده و در فصل‌های خشک باد آن را حمل می‌کند (علوی‌پناه ۲۰۰۰). بنابراین در طرح‌های بیابان‌زدایی باید توجه داشت، که این مناطق کمتر دست‌کاری شود.

ج: رخساره منطقه حمل

در برخی مناطق باد مواد همراه خود را که از دشت‌سرها برداشت کرده است، پس از برخورد با مانع (پوشش گیاهی و یا ناهمواری‌های سطح زمین) و گاهی کاهش سرعت بر جای می‌گذارد و دوباره بادهای با شدت زیادتر آن مواد را جابه‌جا می‌کنند (کیانیان و همکاران ۲۰۱۴). به این رخساره رخساره

در میان انواع گوناگون زمین‌ریخت‌شناختی بیابان، پوشش سنگفرشی یکی از بارزترین ویژگی‌های بیابان به‌شمار می‌آید. بررسی مقاطع عرضی در این زمین‌ها بیانگر آن است، که در سطح لایه نازکی از مواد فرسایش‌یافته درشت دانه، خرده سنگ زاویه‌دار یا گرد وجود دارد، که معمولاً ضخامت یکسانی هم دارند و در زیر آن، سازند ناهمگن از مواد فرسایش‌یافته با رس، لای، ماسه که گاهی میان لایه‌های گچی و آهکی است (فریمپونگ و همکاران ۲۰۲۳؛ ژنگ و همکاران ۲۰۲۲؛ امینی و همکاران ۲۰۲۲؛ چندلر ۲۰۰۹؛ دب‌دپ ۲۰۱۳؛ قنبری و همکاران ۲۰۲۳؛ قضایی و همکاران ۲۰۲۳؛ نیازی و همکاران ۲۰۱۰؛ شایان و همکاران ۲۰۰۶؛ کیانیان و همکاران ۲۰۱۴). در استرالیا به آن دشت ژیر و در کشورهای آفریقای شمالی هامادا و رگ و در ایران دشت ریگی یا سنگفرش بیابان گفته می‌شود. سنگفرش بیابان را بر اساس قطر و اندازه ذرات تشکیل‌دهنده و به‌طور کلی بر مبنای شکل ظاهری آن به چند رخساره تقسیم می‌کنند:

الف: رخساره سنگفرش دانه درشت

عنصرهای تشکیل‌دهنده این رخساره شامل قلوه سنگ و

حمل یا ترانزیت گفته می شود. در طرح های بیابان زدایی شناخت مناطق حمل بسیار مهم است. همچنین، در پاره ای از مناطق سنگ فرش بیابان، که قلوه سنگ های سطحی همگن و حساس به فرسایش و باد سایدگی هستند، شکل های مثلثی شکل دیده می شود. در مناطقی که بافت لایه ای وجود دارد، نیز بر حسب درجه سستی لایه ها و سیمان میان ذرات آثار فرسایش تفریقی باد به شکل برون زدهای نواری و شکل های کنگره ای در جهت رو به باد دیده می شود. این رخساره می تواند نشان دهنده بادهای فرسایش زا و حمل کننده ماسه باشد.

د: رخساره جلای بیابان یا ورنی بیابانی

این رخساره نشان دهنده قشر لعابی و براقی است که سطح خارجی سنگ ها را می پوشاند و به نام ورنی یا جلای بیابان موسوم است (فریدی و همکاران ۲۰۲۲). این پوشش سطحی که رنگ آن از قرمز تیره تا سیاه تغییر می کند، بیشتر از اکسیدهای آهن و منگنز تشکیل شده است، که در آن مقداری سیلیس نیز وجود دارد. پدیده ای که موجب تشکیل این نوع جلای بیابانی می شود، افزایش اکسیدهای آهن و منگنز در اثر تأثیر عمل اکسیداسیون، رطوبت و نور خورشید، تحت تأثیر تبخیر شدید است. نتایج بررسی های انجام شده بیانگر آن است که در شرایط مساعد برای تشکیل ورنی بیابانی ۲۵ سال وقت لازم است (چن و همکاران ۲۰۱۱).

فرایند شناسایی شکل های زمین، موضوعی است، که به وسیله پژوهشگران بسیاری بررسی شده است. تمام تعریف های زمین ریخت شناختی مبتنی بر مطالعه و شناسایی شکل های زمین است. شناخت شکل های زمین و نحوه پراکنش آنها از نیازهای اساسی در علم زمین ریخت-شناختی کاربردی و دیگر علوم محیطی است (شایان ۲۰۰۵). بیش از چند دهه، زمین ریخت شناخت از روش کیفی برای توصیف و بررسی شکل زمین استفاده می کردند تا اینکه در اوایل دهه ۱۹۶۰، از روش های کمی مانند به کارگیری سنجش از دور برای مطالعات شکل های زمین استفاده شد. از سوی دیگر، در روش سنتی برای تشخیص چشمی شکل های زمین از روی داده های سنجش از دور بدون سرعت و دقت لازم وجود یک تفسیرگر متخصص نیز ضروری بود (چنگیز و همکاران ۲۰۰۶؛ دیویس ۲۰۰۲؛ حسین و همکاران ۲۰۲۲). امروزه رویکرد سنتی تفسیر چشمی در شناسایی شکل های زمین به دلیل نبودن دقت و نیز وقت گیر بودن و وابستگی نتایج به تفسیر تفسیرگر، کارایی و سرعت لازم را ندارد. از این رو، استفاده از روش های شناخت خودکار شکل های زمین از روی داده های سنجش از دور ضروری است. همچنین، سنجش از دور، ابزاری توانا برای مطالعه بوم نظام های گوناگون زمین برای تولید داده های با ارزش و مفید از نظر زمانی و مکانی است (ژنگ و همکاران ۲۰۲۲؛ رضایی مقدم ۲۰۰۶؛ فودی ۲۰۰۴؛ آل احمدی و همکاران ۲۰۰۹؛ آدلر برگر و همکاران ۲۰۰۹؛ پاتر ۲۰۱۶؛ فریمپونگ و همکاران ۲۰۲۳؛ امینی و همکاران ۲۰۲۲).

در پژوهشی، آرخی (۲۰۱۴) به منظور تهیه نقشه کاربری زمین های دشت عباس از داده های رقومی سنجده ETM^+ و برای طبقه بندی تصویر از روش های طبقه بندی شبکه عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان و بیشترین احتمال استفاده کرد. سرانجام، نقشه پوشش زمین های منطقه به چهار طبقه زمین های کشاورزی، مرتع فقیر، زمین های بایر و پهنه های ماسه ای تقسیم بندی شد. نتایج این پژوهشگر نشان داد، روش شبکه عصبی مصنوعی (با صحت کامل ۹۸/۳۷٪ و ضریب کاپای ۰/۹۷) در مقایسه با روش ماشین بردار پشتیبان (با صحت کامل ۹۲/۳۶٪ و ضریب کاپای ۰/۸۷) و بیشترین احتمال (با صحت کامل ۸۱/۴۲٪ و ضریب کاپای ۰/۷۳)، در تهیه نقشه کاربری زمین ها عملکرد بهتری داشت. پژوهش نامبرده نشان داد، که می توان با روش طبقه بندی شبکه عصبی، نقشه پوشش زمین را با صحت زیاد تهیه کرد. فتحی زاد و همکاران (۲۰۱۵) برای مقایسه دو روش بیشترین احتمال و فازی به منظور پهنه بندی مراتع آبخیز دوبرج دهلران، از تصویر سال ۲۰۰۷ سنجده ETM^+ ماهواره لندست استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد، که دستورالعمل شبکه عصبی مصنوعی آرت مپ فازی با ضریب ۰/۹۶۱۴ نسبت به دستورالعمل بیشترین احتمال با ضریب ۰/۸۰۵۸، از صحت بیشتری برخوردار بوده است. لیزارازو (۲۰۰۶) برای طبقه بندی کاربری زمین های منطقه شهری بوگوتا در کلمبیا از روش های طبقه بندی درخت تصمیم گیری، شبکه عصبی و بیشترین احتمال استفاده کرد. برای انجام طبقه بندی، تصویر Quickbird به کار برده شد و نقشه کاربری با نه طبقه ایجاد شد. صحت طبقه بندی کاربری زمین ها برای روش های درخت تصمیم گیری، شبکه عصبی و بیشترین احتمال به ترتیب ۷۴، ۶۵ و ۴۰٪ بدست آمد. احمدپور و همکاران (۱۳۹۰) با هدف مقایسه اندازه کارایی سه روش رایج طبقه بندی نظارت شده داده های ماهواره ای (روش حداقل فاصله از میانگین، روش متوازی السطوح و روش بیشترین احتمال) در تشخیص گروه های گیاهی منطقه حفاظت شده گلول و سرانی (استان خراسان شمالی) پژوهشی را انجام دادند. نتایج نشان دادند، که در بین روش های بکار برده شده، روش بیشترین احتمال بیشترین اندازه دقت را در طبقه بندی هر دو گروه داده های ماهواره ای دارد ($KA=0.772$ ، $OA=0.878$ و $KA=0.772$) و در مقابل روش متوازی السطوح نیز کمترین اندازه دقت را در طبقه بندی گروه های گیاهی در منطقه مطالعه شده داشت ($KA=0.478$ ، $OA=0.593$ و $KA=0.478$). نیازی و همکاران (۲۰۰۹) برای جداسازی واحدهای سنگ شناختی، از سه روش طبقه بندی بیشترین احتمال، شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان بر روی تصویرهای لندست TM استفاده نمودند. نتایج پژوهش نشان داد، روش ماشین بردار پشتیبان با صحت ۸۳/۴۲٪، بیشترین صحت را نسبت به دو روش دیگر داشته است. دواپود و راو (۱۹۹۲) در پژوهشی به منظور انتخاب

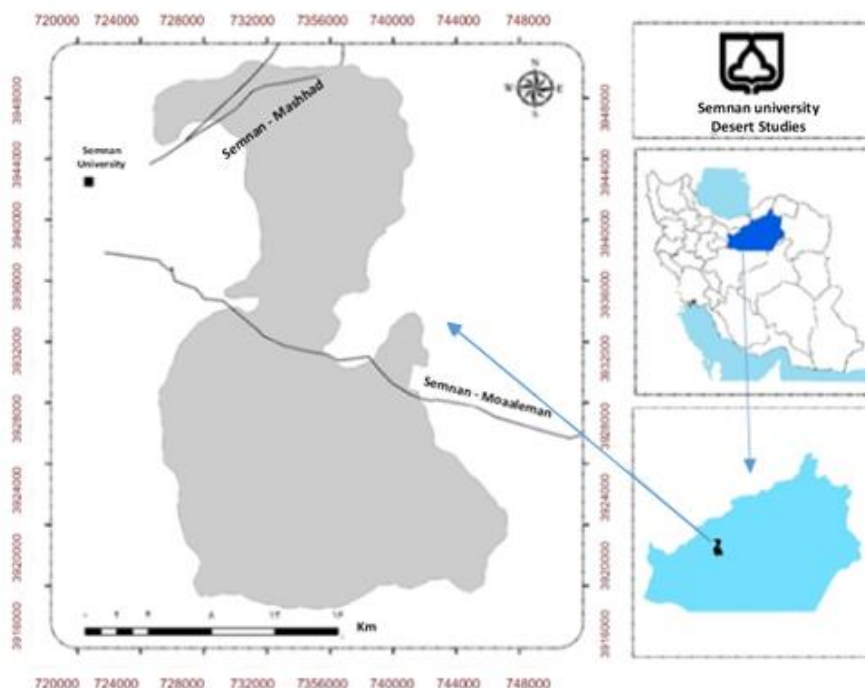
جداسازی و شناسایی با کمک روش‌های جدید (ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی، نقشه زاویه طیفی، واگرایی اطلاعات طیفی و آرت‌مپ فازی) در محیط نرم‌افزارهای ENVI 4.5 و IDRISI Selva، شکل می‌گیرد، که به نوعی روش نوین برای شناخت و طبقه‌بندی آنها است.

مواد و روش‌ها منطقه مطالعه‌شده

منطقه مطالعه‌شده با وسعت ۴۷۶۴۵/۹۸ هکتار، در شهرستان سمنان است. منطقه دارای مختصات جغرافیایی ۵۳°۲۸' تا ۵۳°۴۳' طول شرقی و ۳۵°۲۰' تا ۳۵°۴۰' عرض شمالی است. منطقه مطالعه‌شده از غرب به شهر سمنان و منطقه اعلاء، محدود می‌شود. دانشگاه سمنان در شمال غربی منطقه و بیابان جنوب سمنان در جنوب منطقه است. همچنین، جاده‌های سمنان-جندق و سمنان-دامغان از منطقه مطالعه‌شده عبور می‌کند. بلندی بیشینه منطقه مطالعه‌شده، ۱۵۹۸ متر در شمال شرق منطقه و بلندی کمینه در جنوب غربی منطقه ۵۹۸ متر است (شکل ۱). شیب عمومی منطقه از شمال شرق به جنوب غرب است که با منتهی شدن به بیابان جنوب شرق سمنان، از آن کاسته می‌شود. نقشه منطقه مطالعه‌شده در استان سمنان و ایران در شکل ۱ نشان داده شده است. دلیل انتخاب این منطقه به عنوان منطقه پژوهشی وجود عرصه‌های سنگفرش بیابانی با درصد گوناگونی از ریگ‌ها بود.

بهترین ترکیب باندی ممکن برای تشخیص خاک‌های متأثر از شوری دشت آبرفتی ایندو جانگتیک، از تصویرهای سنجنده TM ماهواره لندست ۴ بهره گرفتند. نتایج نشان داد، ترکیب باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک با ترکیب ۵-۳-۱، بهترین ترکیب برای منطقه مطالعه‌شده می‌باشد.

تهیه نقشه سنگفرش‌ها و انواع آنها، مبنایی برای ارزیابی منطقه از نظر ساختاری و ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناختی فراهم می‌آورد، که در زمینه بسیاری از مسائل مدیریت و برنامه‌ریزی محیطی سودمند بوده و می‌تواند به عنوان الگویی برای مناطق مشابه بکار رود. از آنجا که، تاکنون مطالعاتی برای شناسایی سنگفرش بیابانی با استفاده از تصویرهای ETM⁺ در شهرستان سمنان انجام نپذیرفته است، در این مطالعه در صدد بکارگرفتن روش مناسب برای طبقه‌بندی این شکل‌های زمین با استفاده از روش فوق‌الذکر در این منطقه می‌باشیم. هدف اصلی این پژوهش، با توجه به اهمیت سنگفرش‌های بیابانی به عنوان پوشش خاک زیرین خود و همچنین بررسی کم آنها در کشور و منطقه مذکور در جنوب سمنان، بررسی کاربرد تصویرهای ماهواره‌ای لندست ETM⁺ در زمینه شناسایی و طبقه‌بندی سنگفرش‌های بیابانی است. با استفاده از داده‌های ETM⁺، می‌توان سنگفرش‌های بیابانی را بر اساس درصد تراکم ذرات جداسازی و شناسایی نمود و به این‌که، کدام بخش از طیف یا باندهای تصویر ETM⁺ لندست، برای شناسایی سنگفرش بیابانی مناسب‌تر است؟، دست یافت. این



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

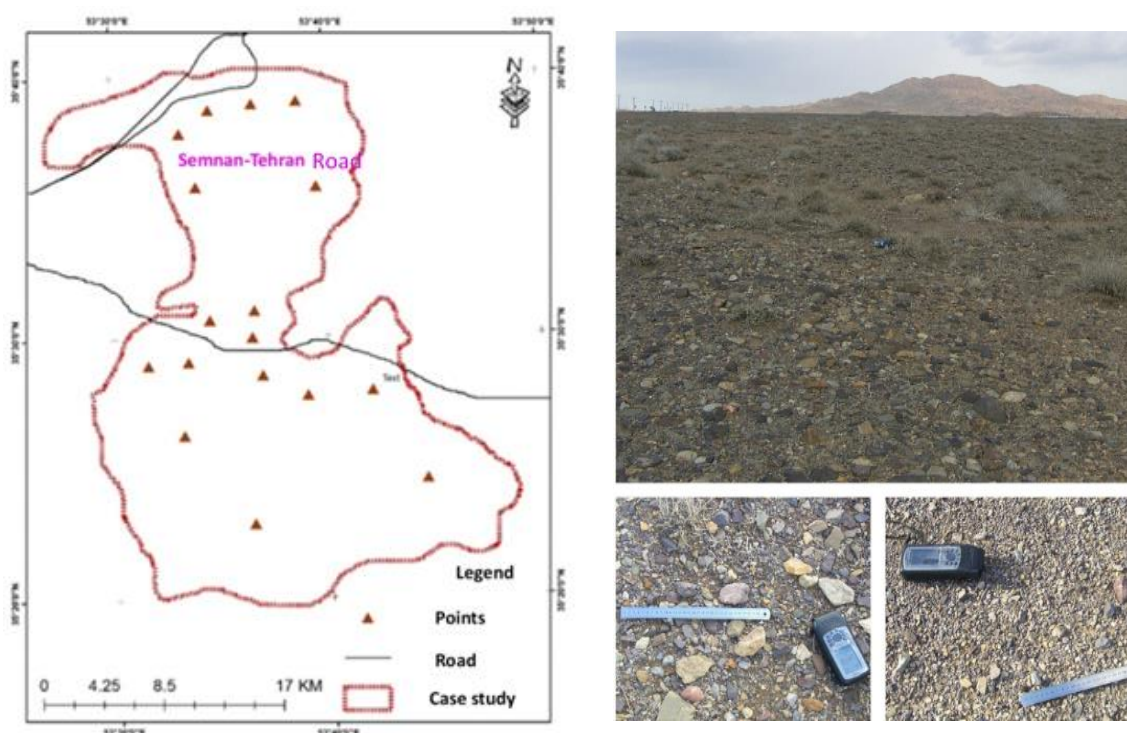
Figure 1- Location of the study area in the Semnan Province and Iran.

کاربری زمین‌ها است. یکی از مزایای این روش "یک در مقابل یک" است. همچنین، می‌توان با این روش همراه با نمونه‌های تعلیمی کوچک تصویر طبقه‌بندی شده را با دقت خوبی تهیه کرد و این مزیت سبب کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت کار می‌شود (جنسن ۲۰۰۵). شبکه عصبی، یکی از روش‌های غیر سنج‌های برای طبقه‌بندی تصویر است و نیازی به فرض بهنجار بودن داده‌ها ندارد (دیکسون و کانداد ۲۰۰۸). با این روش می‌توان توصیف دقیقی از پردازش داده‌های ورودی در خروجی پیشنهاد داد. روش طبقه‌بندی نقشه زاویه طیفی، یکی از روش‌های طبقه‌بندی طیفی تصویرهای ماهواره‌ای است. در این روش، از یک زاویه بدون بعد برای نسبت دادن پیکسل‌های مدنظر به طیف باندی استفاده می‌شود. زمانی این روش استفاده می‌شود که داده‌ها نسبت به انعکاس و اسنجی شده‌اند و تقریباً در مقابل اثرات نور و الیبدو غیرحساس هستند (کروز و همکاران ۱۹۹۳). روش طبقه‌بندی واگرایی اطلاعات طیفی یک روش طبقه‌بندی طیفی است، که از اندازه واگرایی برای تطابق پیکسل‌ها به طیف مدنظر استفاده می‌کند. در این روش هرچه واگرایی کمتر باشد، احتمال شباهت پیکسل‌ها بیشتر است. همچنین پیکسل‌های با انحراف بیشتر از حداکثر آستانه تعیین شده، طبقه‌بندی نمی‌شوند (دو و همکاران ۲۰۰۴). آرت‌مپ فازی بر پایه نظریه تشدید انطباقی است (کارپنتر و همکاران ۱۹۹۱). هر ساختار آرت‌مپ از دو واحد (ARTa, ARTb) تشکیل شده است که طبقات بازشناختی پایداری را در پاسخ به دنباله‌های دلخواه از الگوهای ورودی ایجاد می‌کند. این دو واحد با یکدیگر با یک واحد میانه به نام ناحیه نگاشت (Fab) پیوند می‌یابند. بنابراین، آرت‌مپ فازی از ساختارهای ART فازی به این ترتیب بهره می‌گیرد. مثلاً عملگر (Ω) با عملگر AND فازی جایگزین می‌شود. از این‌رو، در شرق سمنان با استفاده از بازدیدهای میدانی و دستگاه موقعیت‌یاب جهانی، نمونه‌های تعلیمی یا داده‌های آموزشی برداشت شد. باید توجه داشت که داده‌های آموزشی می‌توانند به‌وسیله بازدیدهای صحرایی، نقشه‌ها و یا عکس‌های هوایی تولید شوند، که از آن‌ها برای طبقه‌بندی استفاده می‌شود (مختاری و نجفی ۲۰۱۵). در این پژوهش، نمونه‌های تعلیمی به دو گروه تقسیم‌بندی شدند که یک گروه برای طبقه‌بندی و گروه دوم، برای بررسی صحت طبقه‌بندی استفاده شدند (یوسفی و همکاران ۲۰۱۱).

در این پژوهش از داده‌های ماهواره‌ای چند طیفی ETM^+ به دلیل قدرت جداسازی مکانی، زمانی و به‌ویژه رادیومتری استفاده شد. داده‌های این سنجنده، هفت باند طیفی داشت، که برای منطقه مطالعه شده با ردیف و گذر ۱۶۳ و ۳۵ از پایگاه USGS گرفته شد. در این پژوهش، به منظور شناسایی بهتر انواع سنگ‌فرش بیابان، بازدید و مطالعه صحرایی انجام شد و با بهره‌گیری از پلات و خطکش به شکل تصادفی و با روش تراکم در سطح، اندازه‌گیری تراکم سنگ‌فرش بیابان در پلات‌هایی به ابعاد ۴۰ در ۴۰ سانتی‌متر انجام شد (شکل ۲). سرانجام، نمونه‌های برداشت شده در سه گروه تراکم ۴۰-۲۰، ۷۰-۴۰ و ۹۰-۷۰٪ بر اساس رخساره‌های دشت سر لخت، آپانداز و پوشیده گذاشته شدند. به منظور تعیین مناسب‌ترین باند در تفسیر و طبقه‌بندی تصویرهای ماهواره‌ای، از عاملی به نام عامل شاخص مطلوب ($optimum\ index\ factor$ یا OIF) استفاده شد که ترکیب سه باند را به ترتیب اندازه اطلاعات درجه‌بندی می‌کند (سرمدی و همکاران ۲۰۱۳ و علوی‌پناه ۲۰۰۰). در این پژوهش برای محاسبه OIF، از انحراف معیار و ضریب همبستگی باندها از رابطه ۱ استفاده شد (جنسن ۲۰۱۱).

$$OIF = \frac{\sum SD}{\sum CC} \quad (1)$$

$\sum SD$: مجموع انحراف معیارهای سه باند ترکیبی، $\sum CC$: مجموع قدر مطلق ضریب همبستگی‌های سه باند است. در این پژوهش، برپایه پژوهش‌های انجام شده و به منظور بررسی و شناسایی مهم‌ترین طیف یا باندهای تصویر لندست ETM^+ و شناسایی سنگ‌فرش بیابانی، ۵۶ حالت ترکیب باندی (R-G-B) از تمام باندهای ETM^+ (۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸) در گروه‌های گوناگون در نرم‌افزار ILWIS 3.3 استفاده شد (جدول ۲). باید توجه داشت، که ترتیب باندها در هر ترکیب از RGB در اندازه OIF تأثیری نداشت (قائد و بسواراجا ۲۰۰۸). در این پژوهش، برای تهیه نقشه پهنه‌بندی سنگ‌فرش بیابان از پنج روش طبقه‌بندی نظارت شده شامل ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی، نقشه زاویه طیفی، واگرایی اطلاعات طیفی و آرت‌مپ فازی استفاده شد. روش ماشین بردار پشتیبان یکی از روش‌های جدید برای طبقه‌بندی تصویرهای ماهواره‌ای به منظور استخراج نقشه



شکل ۲- انواع سنگفرش بیابانی و نقشه نقاط نمونه‌برداری در منطقه مطالعه‌شده.
Figure 2- Types of desert pavement and map of sampling points in the study area.

شاخص‌های ارزیابی صحت محاسبه شد. بعد از طبقه‌بندی تصویرهای ماهواره‌ای با استفاده از نمونه‌های تعلیمی که در روند طبقه‌بندی دخالت داده نشده بودند، صحت تصویر طبقه‌بندی شده ارزیابی شد. در این پژوهش از معمول‌ترین سنجه‌های برآورد صحت، شامل صحت تولیدکننده، صحت کاربر، صحت کلی و ضریب کاپا (لئو و همکاران ۲۰۰۴) استفاده شد.

صحت کامل یکی از شاخص‌های رایج برای برآورد اندازه صحت پردازش تصویر است که در این پژوهش با استفاده از رابطه ۲ و داده‌های موجود در ماتریس خطا به دست آمد. صحت کلی نیز با استفاده از رابطه ۲ از جمع عنصرهای قطر اصلی ماتریس خطا تقسیم بر تعداد کل پیکسل‌ها به دست آمد (علوی‌پناه ۲۰۰۵).

$$OA = 1/n \sum_{i=1}^n pii \quad (2)$$

OA: صحت کلی، N: تعداد پیکسل‌های آزمایشی، $\sum pii$: جمع عنصرهای قطر اصلی ماتریس خطا است.

باید توجه داشت که برای داشتن کمترین اندازه خطا در محاسبات و پردازش تصویرها در منطقه مطالعه‌شده، از نمونه‌های تعلیمی ثابتی برای طبقه‌بندی‌های گوناگون استفاده شد و در نمونه‌های تعلیمی تغییری ایجاد نشد. همین شرایط برای نمونه‌های تعلیمی برای ارزیابی نیز لحاظ شد. پس از انجام اصلاحات تصویرها و با توجه به دستورالعمل‌های مطالعه‌شده، برای هر دستورالعمل با استفاده از نرم افزار ENVI 4.5، با کمک نمونه‌های تعلیمی نقشه پهنه‌بندی سنگفرش بیابان برای منطقه پژوهشی تهیه شد. سرانجام، برای از بین بردن اثر فلفل-نمکی که یکی از اثرات معمول در کار با سامانه‌های با قدرت جداسازی متوسط مانند ماهواره‌ی لندست است (لو و وی ۲۰۰۹)، از فیلتر حداکثر 3×3 استفاده شد. برای ارزیابی صحت نقشه‌های به دست آمده از پردازش تصویرهای ماهواره‌ای، ابتدا ماتریس خطا برای داده‌های واقعی و داده‌های پردازش شده تشکیل شد. به این شکل، که داده‌های واقعی و داده‌های به دست آمده از پردازش تصویرها برای هر طبقه در ماتریس خطا گنجانده شد. سپس،

جدول ۱- فهرست گروه های باندی استفاده شده (کواد و بساواراجا ۲۰۰۸؛ سرمستی و همکاران ۲۰۱۳).

Table 1- list of gang groups used (Qaid and Basavarajappa 2008; Sarmasti et al. 2013).

No	Band group	Band Group
1	Visible	Visible
2	Visible spectrum, near infrared, mid infrared	VNIR+SWIR
3	Visible bands, near infrared, thermal infrared	VNIR+TIR
4	Mid infrared, thermal infrared, near infrared	SWIR+TIR
5	Visible, near infrared, mid infrared, thermal infrared	VNIR+SWIR+TIR
6	Near infrared, mid infrared, panchromatic	SWIR+Panchromatic
7	Visible spectrum, near infrared, mid infrared, panchromatic	VNIR+SWIR+Pan
8	Visible spectrum, near infrared, panchromatic	VNIR+Pan
9	Near infrared, mid infrared, thermal infrared, panchromatic	SWIR+TIR+Pan
10	Visible spectrum, near infrared, thermal infrared, panchromatic	VNIR+TIR+Pan

مربوط به آن درصدی از پیکسل ها است، که در واقعیت زمینی مربوط به طبقه مد نظر است، ولی جزء طبقه های دیگر طبقه بندی شده اند. خطای گماشته شده و خطای حذف شده از رابطه های ۶ و ۷ محاسبه شد (فاطمی و رضایی ۲۰۰۵).

$$Ce = 1 - UA \quad (6)$$

$$Oe = 1 - PA \quad (7)$$

Ce: خطای گماشته شده Oe: خطای حذف شده است. برای مشخص کردن مساحت و درصد مساحت طبقات سنگ فرش بیابانی منطقه مطالعه شده با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و در محیط نرم افزار Arc GIS 10.2 نقشه های تولید شده در قالب شکل سلولی TIFF/GEO TIFF با استفاده از ماژول Raster to Polygon به شکل برداری تبدیل شد و مساحت هر طبقه از سنگ فرش بیابان محاسبه شد. سرانجام، خروجی مناسب برای نقشه های به دست آمده در قالب شکل JPEG تهیه شد. مدل اجرایی پژوهش اصلاح شد و تصحیحات رادیومتریک و جوی در بخش پیش پردازش حذف شد.

جداسازی و طبقه بندی انواع سنگ فرش بیابان

به منظور جداسازی و تشخیص انواع سنگ فرش های بیابانی از نظر تراکم پوشش، با کمک نرم افزارهای EDRISI Selva و ENVI 4.5 و تصویرهای سنجنده ETM⁺ از ماهواره لندست، از پنج روش طبقه بندی نظارت شده، ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی، نقشه زاویه طیفی، واگرایی اطلاعات طیفی و آرت مپ فازی استفاده شد. با استفاده از ضریب های صحت کامل، کاپا، صحت کاربر و صحت تولیدکننده هر روش طبقه بندی از نظر صحت طبقه بندی مقایسه و بررسی شد. همچنین، برای هر روش، جدول ماتریس خطا تشکیل شد. در این ماتریس، اندازه تطابق هر طبقه طبقه بندی شده با واقعیت زمینی نمایش داده می شود، که در آن می توان اندازه اشتباه قرار گرفتن (تداخل) یک طبقه را در طبقات دیگر مشاهده کرد. قطر ماتریس خطا، درصد طبقه های درست طبقه بندی شده است و دیگر سلول های آن، اندازه خطاهای گماشته شده (ستون

به دلیل ایرادات صحت کلی، و از آنجایی که در کارهای اجرایی مقایسه صحت طبقه بندی مهم است، از شاخص کاپا استفاده می شود، زیرا، در این شاخص می توان پیکسل های نادرست طبقه بندی شده را در نظر گرفت (یوسفی و همکاران ۲۰۱۱). ضریب کاپا، صحت طبقه بندی را در مقایسه با یک طبقه بندی کاملاً تصادفی (حالتی که یک تصویر کاملاً به شکل تصادفی طبقه بندی شده باشد) را محاسبه می کند. این ضریب با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد (علوی پناه ۲۰۰۹).

$$Kappa = \frac{P_0 - P_c}{1 - P_c} \times 100 \quad (3)$$

p0: درستی مشاهده شده، pc: توافق قابل انتظار است.

صحت تولیدکننده یعنی احتمال اینکه یک پیکسل در تصویر طبقه بندی در همان طبقه در روی زمین باشد، است و صحت کاربر یعنی احتمال اینکه یک طبقه مشخص در روی زمین در همان طبقه روی تصویر طبقه بندی شده باشد، است. در این پژوهش با استفاده از رابطه های ۴ و ۵ صحت تولیدکننده و صحت کاربر محاسبه شد.

$$PA = \frac{ta}{ga} \times 100 \quad (4)$$

$$UA = \frac{ta}{n1} \times 100 \quad (5)$$

PA: دقت طبقه a برای صحت تولیدکننده، ta: تعداد پیکسل های صحیح طبقه بندی شده به عنوان طبقه ga، a: تعداد پیکسل های طبقه a در واقعیت زمینی، UA: درصد دقت طبقه a برای صحت کاربر، n1: تعداد پیکسل های طبقه a در نتیجه طبقه بندی می باشند (نیازی و همکاران ۲۰۰۹).

بر اساس دو صحت نامبرده، دو خطای گماشته شده و حذف شده نیز محاسبه شد. خطای گماشته شده که بر اساس صحت کاربر محاسبه می شود، معادل درصدی از پیکسل ها است، که در حقیقت متعلق به طبقه مد نظر نبوده، ولی طبقه بندی کننده، آنها را جز آن طبقه خاص در نظر گرفته است. خطای حذف شده

هر طبقه در ماتریس خطا) و حذف شده (ردیف هر طبقه در ماتریس خطا) را نشان می‌دهد (احمدپور و همکاران ۲۰۱۱). سرانجام، نقشه پهنه‌بندی مکانی هر روش در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.2 رسم شد.

نتایج

در این پژوهش، به‌منظور تعیین بهترین عامل شاخص مطلوب در رتبه‌بندی ترکیبات رنگی کاذب، داده‌های ETM^+ بر پایه پژوهش‌های مشابه از شش باند انعکاسی، یک باند حرارتی و یک باند پانکروماتیک با قدرت‌های مکانی به‌ترتیب، ۳۰، ۶۰ و ۱۵ متری استفاده شد. نتایج به‌دست آمده از ۲۹ ترکیب باندی برتر در جدول ۲ نشان‌داده شده است. بر پایه نتایج این جدول، برای تشخیص و جداسازی سنگفرش بیابان منطقه

جنوب سمنان، بهترین ترکیب باندی به‌شکل ۳-۴-۶ و اندازه عامل شاخص مطلوب ۷۱/۴۵ بود، که در گروه مادون قرمز میانی یا مرئی (VNIR+TIR) بود. از آنجایی که شاخص OIF نشان‌دهنده اندازه اطلاعات موجود در باندها است و باند مادون قرمز در رتبه‌های اول از شاخص نامبرده به‌دست آمد (باند نامبرده، انحراف معیار زیاد و کمترین تکرار یا به بیان دیگر "همبستگی کم" با باندهای دیگر داشت). از این رو، شاخص OIF، بیانگر اطلاعات بیشتر در باند مادون قرمز بود و همین شاخص در تشخیص سنگفرش منطقه مطالعه‌شده مفید بود. از ترکیب باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک، حرارتی و پانکروماتیک (VNIR+TIR+Panchromatic)، چهار ترکیب باندی به‌دست آمد، که بهترین آنها به‌شکل ۳-۶-۸ و اندازه عامل شاخص مطلوب ۶۹/۷۸ بود و در رتبه ۴ بود.

جدول ۲- بهترین ترکیب باندی RGB برای عامل شاخص مطلوب.

Table 2- The best optimal RGB band combinations.

NO.	Band group	False band composition	The optimal index is desirable
1	3	3-4-6	71.45
2	3	1-3-6	70.37
3	3	1-4-6	74.37
4	10	3-6-8	69.78
5	10	4-6-8	69.29
6	3	2-4-6	68.94
7	10	168	68.62
8	3	2-3-6	68.41
9	5	1-5-6	67.53
10	10	2-6-8	66.07
11	3	1-2-6	65.71
12	9	5-6-8	65.38
13	9	6-7-8	64.13
14	4	5-6-7	56.81
15	2	1-4-5	51.18
16	2	3-4-5	49.80
17	2	1-3-4	49.20
18	2	1-4-7	48.40
19	7	3-4-8	48.36
20	6	5-7-8	48.31
21	2	2-4-5	48.15
22	2	3-4-7	47.86
23	7	1-4-8	46.61
24	7	1-5-8	45.71
25	7	2-4-8	45.60
26	7	1-3-8	43.65
27	8	1-2-8	42.68
28	7	2-3-8	42.47
29	1	1-2-3	42.23

طبقه برونزدگی سنگی با طبقه ۹۰-۷۰٪ تراکم بود، به‌طوری که به‌ترتیب ۲۴/۴۱ و ۷/۲۷٪ از تعداد پیکسل‌ها را طبقه ۹۰-۷۰٪ کسب کرد. در این روش، طبقه با تراکم ۴۰-۲۰٪ کمترین خطای گم‌اشته‌شده را کسب کرد و خطای حذف‌شده آن به‌ترتیب صفر

روش ماشین بردار پشتیبان (SVM)

نتایج ماتریس خطای روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان در جدول ۴ نشان‌داده شده است. بیشترین تداخل مشاهده‌شده در این روش میان طبقه ۷۰-۴۰٪ با طبقه ۹۰-۷۰٪ تراکم و

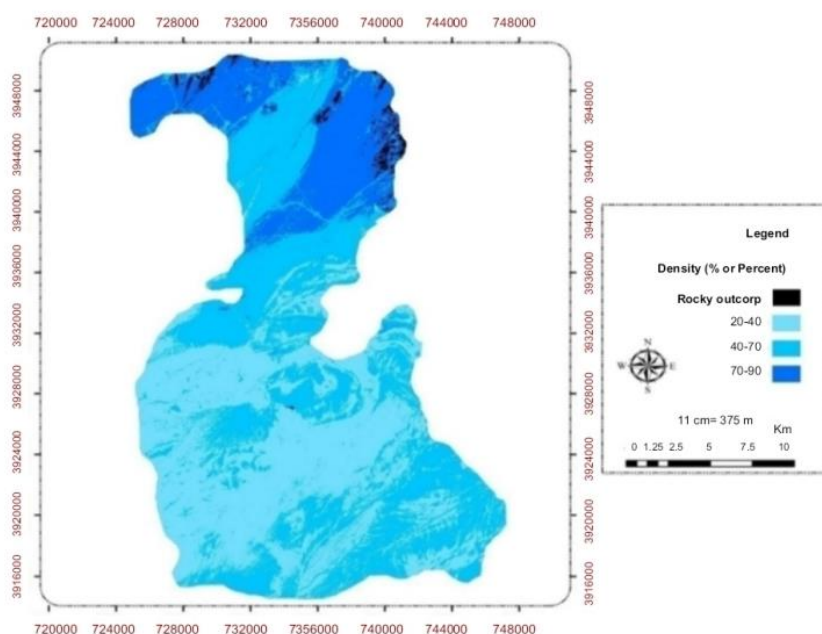
بود (جدول ۳). نقشه پراکنش انواع سنگفرش بیابانی با روش ماشین بردار پشتیبان در شکل ۳ نشان داده شده است.

و ۶/۵۲٪ بود. بیشترین خطای گماشته شده ۲۴/۶۴٪ مربوط به طبقه با تراکم ۷۰-۹۰٪ بود. کاپا و صحت کامل به دست آمده از روش ماشین بردار پشتیبان به ترتیب ۸۵/۰۵ و ۸۸/۷۸

جدول ۳- ضریب های صحت های تولیدکننده، کاربر، کاپا، صحت کامل و مساحت هر طبقه در روش ماشین بردار پشتیبان (SVM).

Table 3- Accuracy coefficients of producer, user, kappa, overall accuracy and area of each class in Support Vector Machine (SVM) method.

Classes	The authenticity of the manufacturer	User validity	Kappa	Overall accuracy	Area (percentage)	Area (hectares)
rocky outcrop	92.73	96.23	82.84	88.55	1.18	564.1
20-40	94.44	100	80.49	86.98	4.86	19449.2
40-70	75.86	88	95.28	96.85	41.57	19789.4
70-90	92.86	75.36	95.99	97.33	16.37	7795.4



شکل ۳- نقشه پراکنش انواع سنگفرش بیابانی بر اساس روش ماشین بردار پشتیبان (SVM).

Figure 3- Distribution map of desert paving types based on Support Vector Machine (SVM) method.

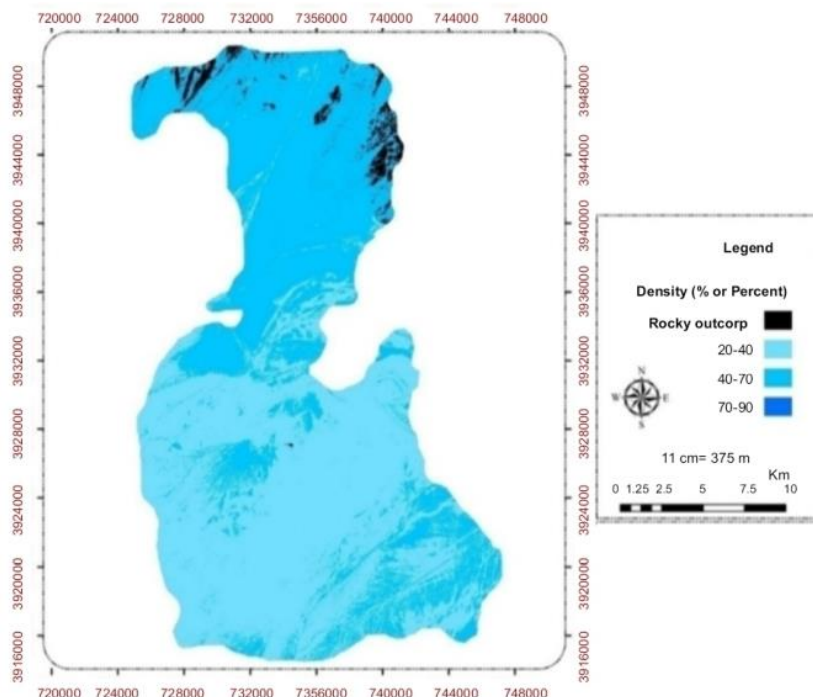
این روش، کمترین خطای گماشته شده مربوط به طبقه با تراکم ۷۰-۹۰٪ با اندازه صفر درصد و کمترین خطای حذف شده با اندازه صفر مربوط به طبقه های برونزدگی سنگی و سنگفرش ۲۰-۴۰٪ بود. بیشترین خطاهای گماشته شده (۵۳/۲۵) و حذف شده (۹۴/۶۴٪) به ترتیب مربوط به طبقه های سنگفرش بیابان با تراکم ۴۰-۷۰ و ۷۰-۹۰٪ بود. زیاده بودن اندازه های تداخل ها و خطاهای گماشته شده و حذف شده، سبب کاهش ضریب های کاپا و صحت کامل شد، به طوری که، اندازه ضریب های نامبرده به ترتیب ۵۵/۱۷ و ۶۶/۳۶ به دست آمد (جدول ۴). مساحت و درصد مساحت هر طبقه بر اساس روش طبقه بندی نظارت شده شبکه عصبی در جدول ۴ نشان داده شده است. بر این اساس، طبقه سنگفرش بیابان با تراکم

روش شبکه عصبی (NN)

نتایج ماتریس خطای روش طبقه بندی شبکه عصبی در جدول ۶ نشان داده شده است. در این روش، میان دو طبقه برونزدگی سنگی و طبقه سنگفرش بیابان با تراکم ۲۰-۴۰٪ تداخلی مشاهده نشد، به طوری که ۱۰۰٪ پیکسل ها به درستی در طبقه مربوط به خود طبقه بندی شدند. بیشترین تداخل در طبقه سنگفرش با تراکم ۷۰-۹۰٪ با طبقه سنگفرش ۴۰-۷۰٪ رخ داد، به طوری که، فقط ۵/۳۶٪ از پیکسل ها درست تشخیص داده شدند و ۷۳/۲۱٪ از پیکسل های این طبقه به طبقه ۴۰-۷۰٪ اختصاص یافت. تداخل بعدی میان طبقه سنگفرش ۴۰-۷۰٪ با طبقه ۲۰-۴۰٪ مشاهده شد. در این طبقه، بیش از ۳۰٪ از پیکسل ها در طبقه سنگفرش با تراکم ۲۰-۴۰٪ بودند. در

هکتار) از کل منطقه را کسب کرد. نقشه طبقه بندی با روش شبکه عصبی در شکل ۴ نشان داده شده است.

۲۰-۴۰٪ با مساحتی برابر با ۵۲/۹۸٪ (۲۵۲۲۱/۸ هکتار)، وسیع ترین طبقه را در این روش کسب کرد. همچنین، طبقه تراکم ۷۰-۹۰٪، کمترین درصد مساحت (۰/۴۶٪) برابر با ۲۲۲/۸



شکل ۴- نقشه پراکنش انواع سنگفرش بیابانی بر اساس روش شبکه عصبی.

Figure 4- Distribution map of desert pavement types based on Neural Network method.

جدول ۴- ضریب های صحت های تولیدکننده، کاربر، کاپا، صحت کامل و مساحت هر طبقه در روش شبکه عصبی.

Table 4- The accuracy coefficients of producer, user, kappa, overall accuracy and area of each class in the neural network method.

Classes	The authenticity of the manufacturer	User validity	Kappa	Overall accuracy	Area (hectares)	Area (percentage)
rocky outcrop	100	79.71	38.50	60.38	1244.9	2.61
20-40	100	72.97	46.48	63.08	25221.8	52.98
40-70	62.07	46.75	82.96	90.32	20908.4	43.92
70-90	5.36	100	80.32	86.82	222.8	0.46

۷۰-۴۰٪ و ۱۴/۲۹٪ دیگر در طبقه برونزدگی سنگی بودند. طبقه ۷۰-۴۰٪ نیز بیشترین تداخل با طبقه سنگفرش بیابان با تراکم ۷۰-۹۰٪ را کسب کرد، به طوری که ۳۱/۰۳٪ از پیکسل ها در این طبقه بودند. کمترین تداخل رخ داده نیز در طبقه با سنگفرش ۲۰-۴۰٪ تراکم بود، که در این شرایط ۹۲/۵۹٪ از پیکسل ها به درستی در طبقه خود تشخیص داده شدند. کمترین خطای گمشته شده نیز مربوط به طبقه سنگفرش بیابان با تراکم ۲۰-۴۰٪ با اندازه ۹/۰۹٪ بود و بیشترین آن نیز مربوط به طبقه با تراکم ۷۰-۴۰٪ با اندازه ۵۳/۲۵٪ بود. بیشترین خطای حذف شده نیز

روش نقشه زاویه طیفی (SAM)

نتایج ماتریس خطای روش طبقه بندی نقشه زاویه طیفی در جدول ۵ نشان داده شده است. ضریب کاپای کلی برای روش نامبرده ۵۳/۸۹٪ و صحت کامل ۶۵/۴۷٪ به دست آمد. نتایج نشان داد، که هر چهار طبقه تداخل داشتند، که اندازه تداخل رخ داده در طبقه های با تراکم سنگفرش ۷۰-۹۰٪، ۴۰-۷۰٪ بود و طبقه برونزدگی سنگی شدت بیشتری داشت. در طبقه سنگفرش بیابان با تراکم پوشش ۷۰-۹۰٪، فقط ۴۶/۴۳٪ از پیکسل ها به درستی در طبقه خود تشخیص داده شدند، در حالی که، ۳۹/۲۹٪ از پیکسل ها را در طبقه

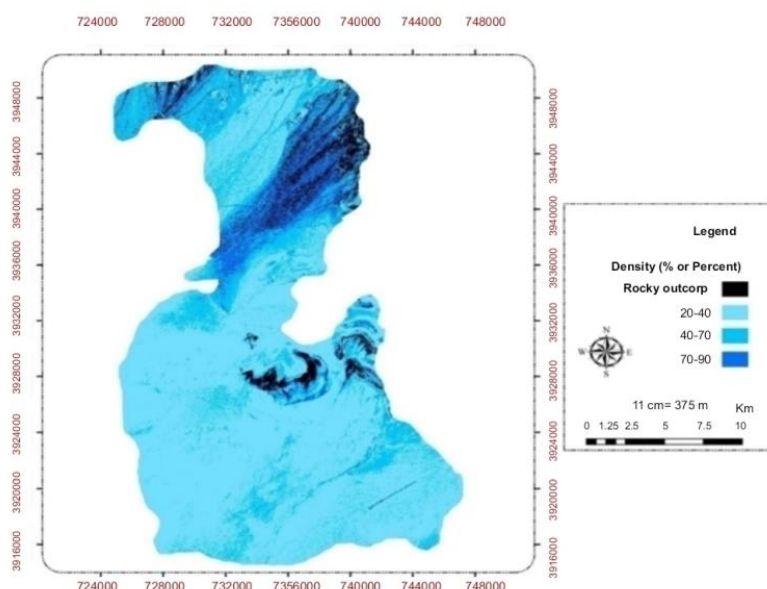
وسعت از منطقه را در برگرفت. همچنین، طبقه سنگ‌فرش بیابان با اختلاف ۱/۱٪ در مقایسه با طبقه سنگ‌فرش با تراکم ۷۰-۹۰٪ با مساحت ۳۰۶۹/۷ هکتار، کمترین وسعت از منطقه را در بر گرفت (جدول ۵). نقشه پهنه‌بندی با روش نقشه زاویه طیفی در شکل ۵ نشان‌داده شده است.

۵۳/۵۷٪ برآورد شد، که مربوط به طبقه سنگ‌فرش با تراکم ۷۰-۹۰٪ بود. همچنین، کمترین خطای حذف‌شده ۷/۴۱٪ بود که مربوط به طبقه سنگ‌فرش بیابان با تراکم ۲۰-۴۰٪ بود (جدول ۵). بر پایه پهنه‌بندی انجام‌شده، طبقه سنگ‌فرش بیابان با تراکم ۲۰-۴۰٪ با اندازه ۲۹۹۴۷/۵ هکتار (۶۲/۹۱٪) بیشترین

جدول ۵- ضریب‌های صحت‌های تولیدکننده، کاربر، کاپا، صحت کامل و مساحت هر طبقه در روش نقشه زاویه طیفی (SAM).

Table 5- The accuracy coefficients of the producer, user, kappa, overall accuracy and area of each class in the Spectral Angle Map (SAM) method.

Classes	The authenticity of the manufacturer	User validity	Kappa	Overall accuracy	Area (hectares)	Area (percentage)
rocky outcrop	61.82	77.27	56.14	70.88	3069.7	6.44
20-40	92.59	90.91	37.66	58.53	29947.5	62.91
40-70	62.07	46.75	82.74	88.70	11085.3	23.28
70-90	46.43	55.32	73.41	82.19	3495.7	7.34



شکل ۵- نقشه پراکنش انواع سنگ‌فرش بیابانی بر اساس روش نقشه زاویه طیفی (SAM).

Figure 5- Distribution map of desert pavement types based on the Spectral Angle Map (SAM) method.

سنگی و باقی‌مانده در طبقه سنگ‌فرش با تراکم ۲۰-۴۰٪ بودند. همچنین، تداخل زیادی در طبقه ۲۰-۴۰٪ در مقایسه با طبقه سنگ‌فرش بیابان با تراکم ۴۰-۷۰٪ مشاهده شد، به‌طوری که ۴۸/۱۵٪ از پیکسل‌ها در این طبقه بودند. کمترین خطای گم‌اشته‌شده مربوط به طبقه سنگ‌فرش بیابان با تراکم ۲۰-۴۰٪ با اندازه ۲۴/۳۳٪ بود و بیشترین آن مربوط به طبقه با تراکم ۴۰-۷۰٪ با اندازه ۶۱/۸٪ بود. بیشترین خطای حذف‌شده نیز ۶۶/۰۷٪ برآورد شد، که مربوط به طبقه سنگ‌فرش با تراکم ۷۰-۹۰٪ بود. همچنین، کمترین خطای حذف‌شده ۴۱/۳۸٪ بود که مربوط به طبقه سنگ‌فرش بیابان با تراکم ۴۰-۷۰٪ بود (جدول ۷). طبقه سنگ‌فرش بیابان با تراکم ۲۰-۴۰٪ با اندازه ۲۵۳۸۰/۸ هکتار (۵۳/۳۲٪) بیشترین وسعت از منطقه را

روش واگرایی اطلاعات طیفی (SID)

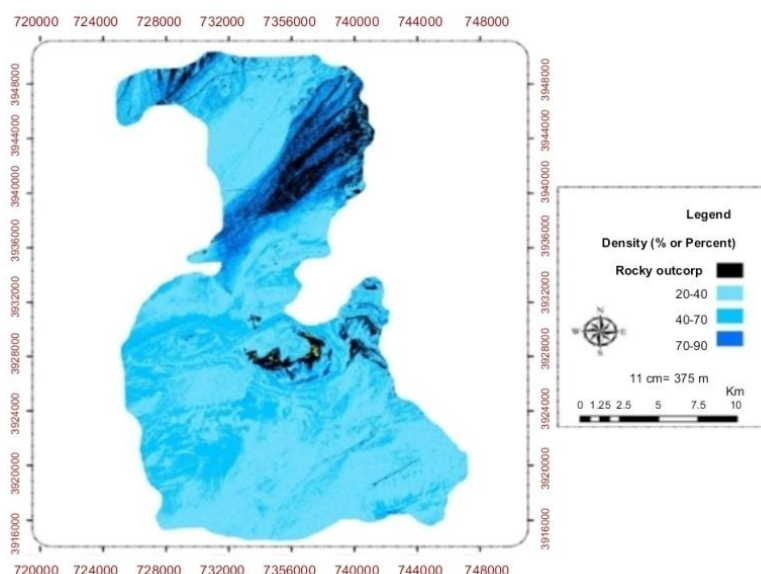
نتایج ماتریس خطای روش طبقه‌بندی واگرایی اطلاعات طیفی در جدول ۱۰ نشان‌داده شده است. ضریب کاپای کلی برای روش نامبرده ۴۴/۳۳٪ و صحت کامل نیز ۵۰/۲۲٪ به‌دست آمد، که ضریب‌های برآوردشده بیانگر توانا نبودن مدل نامبرده در جداسازی دقیق طبقه‌های سنگ‌فرش بیابان است. نتایج نشان داد، که در هر چهار طبقه تداخل زیادی رخ داد، که اندازه تداخل رخ‌داده در طبقه سنگ‌فرش با تراکم ۷۰-۹۰٪، شدت بیشتری در مقایسه با دیگر طبقه‌ها داشت، به‌طوری که، در طبقه نامبرده فقط ۳۳/۹۳٪ از پیکسل‌ها به‌درستی در طبقه خود تشخیص‌داده شدند، در حالی که، ۳۲/۱۴٪ از پیکسل‌ها در طبقه ۴۰-۷۰٪ و ۲۸/۵۷٪ از پیکسل‌ها در طبقه برونزدگی

در برگرفت. همچنین، طبقه سنگفرش با تراکم ۷۰-۹۰٪ با مساحت ۳۱۶۹/۵ هکتار (۶/۶۵٪)، کمترین وسعت از منطقه را در برگرفت (جدول ۶). نقشه پهنه‌بندی با روش نقشه زاویه طیفی در شکل ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶- ضریب‌های صحت‌های تولیدکننده، کاربر، کاپا، صحت کامل و مساحت هر طبقه با روش واگرایی اطلاعات طیفی.

Table 6- The accuracy coefficients of producer, user, kappa, overall accuracy and area of each class in the Spectral Information Divergence method.

Classes	The authenticity of the manufacturer	User validity	Kappa	Overall accuracy	Area (hectares)	Area (percentage)
rocky outcrop	56.36	62.00	30.65	54.36	3450.5	7.24
20-40	51.85	75.68	20.60	52.50	25380.8	53.32
40-70	58.62	38.20	55.93	70.90	15597.4	32.76
70-90	33.93	40.43	51.38	66.90	3169.5	6.65



شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی مکانی انواع سنگفرش بیابانی بر اساس روش واگرایی اطلاعات طیفی (SID).

Figure 6- Spatial zoning map of desert pavement types based on the Spectral Information Divergence (SID) method.

۷۰-۹۰٪ و برعکس طبقه سنگفرش با تراکم ۷۰-۹۰٪ در مقایسه با طبقه برونزدگی سنگی تداخل داشتند. به طور کلی، خطاهای گماشته‌شده و حذف‌شده نیز کمتر از ۱۸٪ به دست آمد. کمترین خطای گماشته‌شده ۲/۷۸٪ مربوط به طبقه سنگفرش بیابان با تراکم ۲۰-۴۰٪ بود و کمترین خطای حذف‌شده نیز مربوط به طبقه سنگفرش با تراکم ۴۰-۷۰٪ با اندازه ۵/۵۶٪ بود (جدول ۷). نتایج پهنه‌بندی مکانی طبقه‌های سنگفرش بیابان بر اساس مساحت و درصد مساحت در جدول ۷ نشان داده شده است. بر اساس نتایج روش طبقه‌بندی نظارت‌شده آرت‌مپ فازی، طبقه سنگفرش با تراکم ۲۰-۴۰٪ با مساحت ۲۳۶۲۹/۵ هکتار (۴۹/۶۴٪)، بیشترین وسعت را از منطقه را در برگرفت. همچنین، طبقه برونزدگی سنگی با مساحت ۸۷۸/۹ هکتار (۱/۸۴٪)، کمترین وسعت را از منطقه پوشش داد (جدول ۷). نقشه پهنه‌بندی با روش آرت‌مپ فازی در شکل ۷ نشان داده شده است.

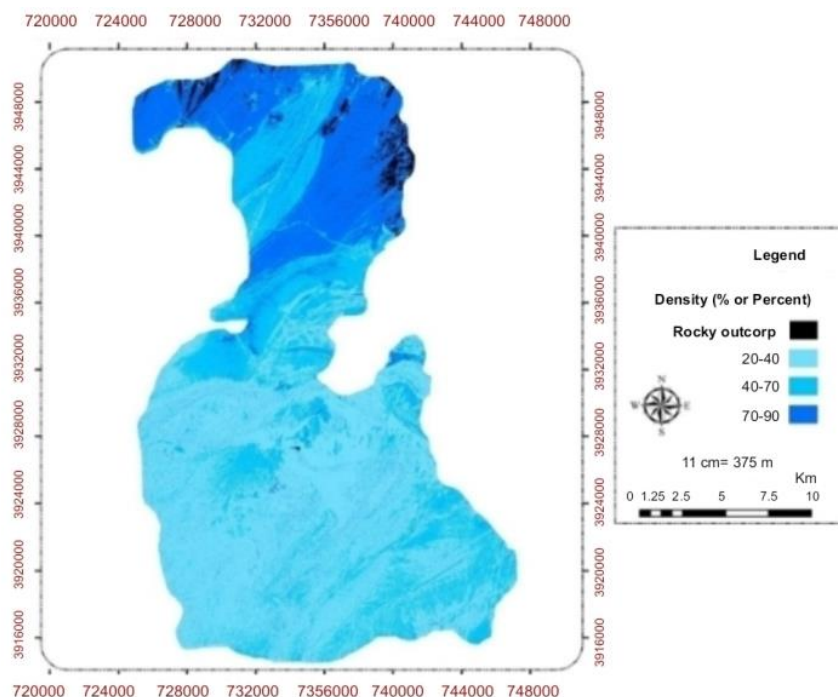
روش طبقه‌بندی نظارت‌شده آرت‌مپ فازی

نتایج ماتریس خطای روش طبقه‌بندی آرت‌مپ فازی در جدول ۱۲ نشان داده شده است. ضریب کاپای کلی برای روش نامبرده ۸۳/۴۱٪ و صحت کامل نیز ۸۷/۶۷٪ برآورد شد، که ضریب‌های برآوردشده بیانگر توانایی زیاد دستورالعمل‌های محاسبه‌ای مدل نامبرده در جداسازی طیفی طبقه‌های سنگفرش بیابان بود. به طور کلی، در روش نامبرده، کمبودن خطاهای حذف‌شده، بیانگر تداخل کم میان طبقه‌های سنگفرش بیابان است. کمترین تداخل رخ داده در طبقه سنگفرش بیابان با تراکم ۴۰-۷۰٪ بود، به طوری که، ۹۴/۲۴٪ از پیکسل‌ها به درستی در طبقه خود شناسایی شدند. بیشترین تداخل نیز در طبقه با تراکم سنگفرش ۲۰-۴۰٪ رخ داد. در این طبقه، ۸۱/۳۹٪ از پیکسل‌ها به درستی در طبقه خود، ۱۱/۶۲٪ از پیکسل‌ها در طبقه سنگفرش با تراکم ۷۰-۹۰٪ و ۶/۹۷٪ از پیکسل‌ها در طبقه با سنگفرش ۴۰-۷۰٪ بودند. در روش نامبرده، طبقه برونزدگی سنگی در مقایسه با طبقه سنگفرش با تراکم

جدول ۷- ضریب‌های صحت‌های تولیدکننده، کاربر، کاپا، صحت کامل و مساحت هر طبقه در روش آرت‌مپ فازی.

Table 7- The accuracy coefficients of producer, user, kappa, overall accuracy and area of each class in Fuzzy Artmap method.

Classes	The authenticity of the manufacturer	User validity	Kappa	Overall accuracy	Area (hectares)	Area (percentage)
rocky outcrop	92.72	85	81.68	84.16	878.9	1.84
20-40	81.39	97.22	82.63	88.93	23729.5	49.64
40-70	94.44	91.89	95.34	97.46	12595.5	26.46
70-90	83.0	81.48	94.67	96.45	10494.1	22.04



شکل ۷- نقشه پهنه‌بندی مکانی انواع سنگ‌فرش بیابانی بر اساس روش آرت‌مپ فازی.

Figure 7- Spatial zoning map of desert pavement types based on fuzzy Art map method.

حرارتی در مناطق کویری سیاه-کوه و ابرکوه اهمیت داشت، هم‌راستا است که دلایل احتمالی آن می‌تواند به شرایط خاک و اقلیم، داده‌های ماهواره‌ای و منطقه جغرافیایی مربوط باشد. در پژوهش‌های انجام‌شده به‌وسیله سرمستی (۲۰۱۳)، فریمپونگ و همکاران (۲۰۲۳)، امینی و همکاران (۲۰۲۲) و کواد و بساواراجا (۲۰۰۸)، بهترین ترکیب باندهای مرئی و مادون قرمز حرارتی به‌شکل ۳-۴-۶ به‌دست آمد، که از این دیدگاه با این پژوهش هماهنگی دارد. بدون شک نتایج گوناگون این پژوهش‌ها به‌دلیل اختلافات اقلیمی و جغرافیایی، زمان برداشت اطلاعات به‌وسیله ماهواره، خصوصیت‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی شکل‌های زمین و دیگر عارضه‌های موجود در منطقه است. عامل‌های گوناگونی از جمله سنجه‌های جوی، روش‌های استفاده‌شده، نوع تصویرهای ماهواره‌ای، فصل، روز و ساعت دریافت تصویرها، صحت، اندازه خطاها و جنس زمین در نتایج

بحث و نتیجه‌گیری

تشخیص بهترین ترکیب باندی برای استفاده مطلوب از داده‌های چندطیفی، یک ضرورت است. انتخاب بهترین ترکیب باندی با مقایسه چشمی تصویرها، مشکل و وقت‌گیر است. بنابراین، می‌توان با روش رقومی از عاملی به نام عامل شاخص مطلوب (OIF)، برای تعیین مناسب‌ترین ترکیب باندی به‌منظور ایجاد بهترین تصویر رنگی کاذب و تعیین مناسب‌ترین باندها برای طبقه‌بندی رقومی استفاده کرد (علوی‌پناه ۲۰۰۰). در این پژوهش نتایج به‌کارگیری عامل شاخص مطلوب نشان داد، که بهترین ترکیب باندی برای تشخیص و جداسازی سنگ‌فرش بیابان منطقه جنوب سمنان، به‌شکل ترکیب باندی ۳-۴-۶ و با اندازه عامل شاخص مطلوب ۷۱/۴۵ بود، که در گروه مرئی و مادون قرمز حرارتی (VNIR+TIR) بود. این یافته با نتایج پژوهش علوی‌پناه (۱۹۹۸) که گزارش کردند، باند مادون قرمز

بردار پشتیبان و روش آرت‌مپ فازی، طبقه سنگ‌فرش با تراکم ۹۰-۷۰٪، بیشترین خطای گماشته‌شده را کسب کرد. به بیان دیگر، دستورالعمل‌های محاسبه‌ای در روش‌های نامبرده به گونه‌ای بود، که درصد بیشتری از پیکسل‌ها که مربوط به طبقه‌های دیگر مربوط بودند به شکل اشتباه به طبقه سنگ‌فرش با تراکم ۹۰-۷۰٪ اختصاص یافتند. همچنین، روش‌های ماشین بردار پشتیبان و آرت‌مپ فازی، کمترین اندازه‌های خطای حذف‌شده را داشتند. یعنی در مقایسه با دیگر روش‌ها، درصد کمتری از پیکسل‌ها که به یک طبقه مربوط بودند، به طبقه‌های دیگر اختصاص یافتند. در بیشتر روش‌های طبقه‌بندی، بجز روش شبکه عصبی، درصد خطای حذف‌شده غالباً کمتر از ۶۰٪ برآورد شد. به طور کلی، منحنی‌های مربوط به خطاهای گماشته‌شده و حذف‌شده در ۵ روش طبقه‌بندی در منطقه مطالعه‌شده از روند تقریباً هماهنگی (موازی) پیروی کرد، این هماهنگی نشان‌دهنده این واقعیت بود، که اندازه خطای به‌دست آمده برای طبقه‌های گوناگون در انواع روش‌های طبقه‌بندی متفاوت می باشد. همچنین، بر پایه نتایج این پژوهش، باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و حرارتی، بهترین ترکیب رنگی کاذب را ایجاد کردند و باند مادون قرمز حرارتی نیز در تشخیص سنگ‌فرش بیابان منطقه خشک جنوب سمنان اهمیت زیادی داشت. همچنین، در داده‌های ETM^+ ، درصد تراکم ذرات سنگ‌فرش‌های بیابانی در جداسازی و شناسایی انواع گوناگون آنها مؤثر بود.

سرانجام می‌توان گفت، فناوری سنجش از دور به دلیل تولید تصویرهای ماهواره‌ای با وضوح فضایی و طیفی زیاد، می‌تواند ابزار ارزشمندی برای شناسایی و طبقه‌بندی شکل‌های زمین باشد. تهیه نقشه سنگ‌فرش‌ها و انواع آنها، مبنایی برای ارزیابی منطقه از نظر ساختاری و ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناختی فراهم می‌آورد، که می‌تواند در زمینه بسیاری از مسائل مدیریت و برنامه‌ریزی محیطی سودمند باشد. پیشنهاد می‌شود، از دیگر روش‌های طبقه‌بندی مبتنی بر برشی‌گرا بودن، روش‌های ترکیبی، فرکانس پوششی، تصویرهای سنجنده‌های با قدرت جداسازی مکانی و طیفی بهتر و لحاظ کردن خصوصیات هم‌چون قطر ذرات استفاده شود، تا در تهیه نقشه‌های طبقه‌های سنگ‌فرش بیابانی اثربخش باشد.

تأثیرگذار است. از سوی دیگر، روش‌های طبقه‌بندی استفاده‌شده در این پژوهش از نظر ساختمان و پیچیدگی دستورالعمل با هم متفاوت بودند. از این‌رو، برای ارزیابی عملکرد و توانمندی روش‌های استفاده‌شده، ضریب‌های کاپا و صحت کامل برای آنها محاسبه شد. ضریب‌های دقت نتایج طبقه‌بندی به‌دست آمده از روش‌های استفاده‌شده، تفاوت‌هایی را نشان داد. با توجه به اینکه طبقه‌ها، باندها و دیگر شرایط استفاده شده برای تمام روش‌ها یکسان بود، بنابراین، در این شرایط اختلاف موجود در صحت، فقط به دستورالعمل‌های محاسبه‌ای روش‌ها بستگی داشت. به بیان دیگر، دستورالعمل محاسبه‌ای در روش‌های نامبرده توانایی زیادی در جداسازی طبقه‌های گوناگون سنگ‌فرش بیابان داشتند. به‌طور کلی، می‌توان گفت طبقه‌هایی که از نظر طیفی جداسازی‌پذیر بودند، در همه روش‌ها تقریباً دقت زیادی را نشان دادند. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های نصیری (۱۹۹۷)، کاویانی‌آهنگر و همکاران (۲۰۲۴)، ژنگ و همکاران (۲۰۲۲)، حسین و همکاران (۲۰۲۲) و فریدی و همکاران (۲۰۲۲) هماهنگی دارد. در این پژوهش، بر اساس ضریب‌های کاپا به‌دست آمده از روش‌های ماشین بردار پشتیبان (۰۵/۸۵)، آرت‌مپ فازی (۴۴/۸۱)، شبکه عصبی (۱۷/۵۵)، نقشه زاویه طیفی (۸۹/۵۳) و واگرایی اطلاعات طیفی (۲۲/۵۰)، به ترتیب روش‌های نامبرده بیشترین توانایی را در جداسازی طیفی طبقه گوناگون سنگ‌فرش بیابان جنوب سمنان داشتند. روش‌های طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان و آرت‌مپ فازی به ترتیب بیشترین ضریب کاپا را برای طبقه‌ها کسب کردند. کمترین ضریب کاپا و صحت کامل نیز به ترتیب مربوط به روش‌های شبکه عصبی، نقشه زاویه طیفی و واگرایی اطلاعات طیفی بود. این نتایج با یافته‌های بریان و همکاران (۲۰۱۱) و دیکسون و همکاران (۲۰۰۸) همخوانی دارد. یافته‌های این پژوهشگران نشان داد، که از میان روش‌های ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی و بیشترین احتمال، روش ماشین بردار پشتیبان با صحت کامل ۹۴/۱۵٪، بیشترین دقت را داشت، که بیانگر آن بود که درصد زیادی از پیکسل‌ها، به‌درستی طبقه‌بندی شده‌اند. همچنین، خطاهای گماشته‌شده در روش‌های آرت‌مپ فازی و ماشین بردار پشتیبان در مقایسه با دیگر روش‌ها کمتر بود، که بیانگر توانایی زیاد روش‌های نامبرده در طبقه‌بندی پیکسل‌ها در طبقه‌بندی‌های مربوط به خود است. در روش‌های ماشین

فهرست منابع

- Adelsberger K, Smith R, Jennifer R. 2009. Desert pavement development and landscape stability on the Eastern Libyan Plateau, Egypt. *Geomorphology*, 107 (3-4): 178-194. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.12.005>.
- Ahmadpour A, Soleimani K, Shokri M, Ghorbani J. 2011. Comparison of three common methods in supervised classification of satellite data for vegetation studies. *Journal of Applied RS and GIS Techniques in Natural Resource Science*, 5 (3): 77-89.
- Al-Ahmadi FS, Hames AS. 2009. Comparison of four classification methods to extract land use and land cover from raw satellite images for some remote arid areas, Kingdom of Saudi Arabia. *JKAU, Earth Science*, 20 (1): 167-191. <http://dx.doi.org/10.4197/Ear.20-1.9>.
- Alavipanah SK. 2005. Application of remote sensing in earth sciences, Tehran University, 268 p. (In Persian).
- Alavipanah SK. 2000. Evaluating the performance of Landsat TM satellite spectral bands in studies of Iranian deserts, *Journal of Natural Resources of Iran*, 53 (1): 67-78. (In Persian).
- Amini S, Saber M, Rabiei-Dastjerdi H, Homayouni S. 2022. Urban land use and land cover change analysis using random forest classification of landsat time series. *Remote Sensing*, 14 (11): (1-23). 10.3390/rs14112654.
- Arkhi S. 2014. Comparing accuracy of artificial neural network, Support Vector Machine and maximum likelihood Algorithms for land use classification (Case study: Dashat Abbas arid region, Ilam Province, *Grazing magazine*). 1(2): 30-43. (In Persian).
- Brian WS, Qi C, Michael B. 2011. A comparison of classification techniques to support land cover and land use analysis in tropical coastal zones. *Applied Geography*, 31(2): 525-532. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.11.007>.
- Cengiz O, Sener E, Yagmurlu F. 2006. A satellite image approach to the study of lineaments, circular structures and regional geology in the Golcuk Crater district and its environs (Isparta, SW Turkey). *Journal of Asian Earth Sciences*, 27 (2): 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.02.005>.
- Chander G, Markham BL, Helder DL. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5): 893-903.
- Chen J, Zhu X, Vogelmann J. E, Gao F, Jin S. 2011. A simple and effective method for filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images. *Remote Sensing of Environment*, 115(4): 1053-1064. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.12.010>.
- Debdip B. 2013. Optimum index factor (OIF) for Landsat data: A case study on Barasat town, west Bengal, INDIA. *International Journal of Remote Sensing and Geoscience (IJRSG)*, 2 (5): 10-17.
- Dixon B, Candade N. 2008. Multispectral land use classification using neural networks and support vector machines: one or the other, or both. *International Journal of Remote Sensing*, 29(4): 1185-1206. <https://doi.org/10.1080/01431160701294661>.
- Fatemi, SB, Rezaei, Y. 2005. Basics of Remote Sensing, Azadeh Publications, 265 p.
- Fathizad H, Fallah Shamsi R, Mahdavi A, Arkhi S. 2015. Comparison of two classification methods of maximum probability and artificial neural network of fuzzy Art map in making Range land cover maps (case study: Range land area of Doviraj area, Dehloran). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 22 (1): 59-72. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2015.13223>.

- Foody GM. 2004. Thematic map comparison: Evaluating the statistical significance of differences in classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70 (5): 627–633. <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.70.5.627>.
- Friedl Mark A, Woodcock Curtis E, Olofsson P, Zhu Z, Loveland T, Stanimirova R, Arevalo P, Bullock E, Hu KT, Frimpong Bernard F, Koranteng A, Atta-Darkwa T, Junior Opoku F, Zawila-Niedzwiecki T. 2023. Land cover changes utilising Landsat Satellite imageries for the Kumasi Metropolis and Its Adjoining Municipalities in Ghana (1986–2022). *Sensors*, 23 (5): 1-20. 10.3390/s23052644.
- Ghanbari A, Feizizadeh B, Ayyed AM. 2023. Evaluation of land use changes with an emphasis on the water scarcity impacts and using remote sensing and GIS (Case study: Babylon Province, Iraq), 3 (7): 120-144. 10.22034/rsgi.2024.57669.1054. (In Persian).
- Ghazaie H, Azizi Z, Aghamohammadi H. 2023. Analysis of satellite plant spectral indices in the detection of health stress in pistachio orchards, *Pistachio Science and Technology*. 7 (13): 21-37. (In Persian).
- Hussain S, Lu L, Mubeen M, Nasim W, Karuppannan S, Fahad Sh, Tariq A, Mousa BG, Mumtaz F, Aslam M. 2022. Spatiotemporal Variation in Land Use Land Cover in the Response to Local Climate Change Using Multispectral Remote Sensing Data. *Land*, 11 (5): 1-19. <https://doi.org/10.3390/land11050595>.
- Jensen JR. 2011. Introductory digital image processing: a remote sensing prospective. Prentice-Hall, series in geographic information science, PP: 1-164.
- Kaviani Ahangar S, Mahdavi R, Zehtabian G, Gholami H, Chapagain A K. 2024. Monitoring of vegetation and land use changes process using Landsat data (Case study: Sarvestan Plain). *Applied researches in Geographical Sciences*. 24 (72): 327-340. <http://dx.doi.org/10.52547/jgs.24.72.327>.
- Kianian M.K. 2014. Studying surface properties of desert pavements and their relation to soil properties and plant growth in Hajaligholi playa, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(1):1457–1461. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0738-8>.
- Luo J, Wei YD. 2009. Modeling spatial variations of urban growth patterns in Chinese cities: the case of Nanjing.-*Landscape and Urban Planning*, 91(2): 51-64. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.11.010>.
- Mokhtari MH, Najafi A. 2015. Comparison of support vector machine and artificial neural network classification methods in extracting land uses from Landsat TM satellite images, *Journal of Agricultural Sciences and Techniques and Natural Resources, Water and Soil Sciences*, 19 (72): 35-45. (In Persian).
- Nasiri A. 1997. Evaluation of several spatial and spectral classification algorithms in the preparation of land use and land cover maps from remote sensing data, Master's thesis in remote sensing, Tarbiat Modares University. 97 p. (In Persian).
- Niazi Y, Akhsati MR, Malekinejad H, Hosseini Z, Morshedi J. 2010. Comparison of two methods of maximum likelihood classification and artificial neural network in the extraction of land use map, a case study, Ilam Dam Basin, *Journal of Geography and Development*, 8 (20): 119-132. (In Persian). <https://doi.org/10.22111/gdij.2010.633>.
- Potter Ch. 2016. Mapping changes in desert pavement surfaces of the lower Colorado Desert of southern California using Landsat time series analysis. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 5 (6): 1747-1754. <https://dx.doi.org/doi:10.23953/cloud.ijarsg.57>.
- Qaid Ali M, Basavarajappa HT. 2008. Application of optimum index factor technique to Landsat-7 Data for geological mapping of north east of Hajjah, Yemen. *American-Eurasian Journal of Scientific Research* 3 (1): 84-91. Corpus ID: 55355421.

- Rezaei Moghadam MH, Saghafi M. 2006. The research on the geomorphologic evaluation of Kahak Playa in south Khorasan Province based on using satellite images and fuzzy logic methods, *Journal of Geography and Development*, 4 (8): 43-60. (In Persian).
- Sarmaſti N, Fathi MH, Ayase F, Bigipour Motlaq F, Suzandeh F. 2013. The application of the optimal index factor technique of ETM Landsat 7 data in the evaluation of Kashan salt crusts. The second international conference on environmental hazards. pp. 1-13. (In Persian).
- Shayan S, Malamhar Alizadeh, F, Jannati M. 2006. Remotely sensed data efficiency on landform maps production and its role in environmental planning: A case study of Semnan Province/Iran, *The Journal of Spatial Planning. MJSP*, 9(2): 111-148 (In Persian). <http://hsm.sp.modares.ac.ir/article-21-8982-en.html>.
- Yousefi S, Taze M, Mirzaei S, Moradi HR, Tawanger Sh. 2011, Comparison of different classification algorithms of satellite images in the preparation of land use maps (Case study: Noor City). *Journal of Application of Remote Sensing and GIS in Natural Resource Sciences*. 2(2): 15-25. (In Persian). <http://isj.iup.ir/index.aspx?pid=95744&jid=186>.
- Zhang X, Zhao T, Xu H, Liu W, Wang J, Chen X, Liu L. 2022. GLC-FCS30D: The first global 30-m land-cover dynamic monitoring product with a fine classification system from 1985 to 2022 using dense time-series Landsat imagery and continuous change-detection method. *Earth System Science Data*. 16 (3): 1353–1381. <https://doi.org/10.5194/essd-16-1353-2024>.



Fars Agricultural and Natural Resources
Research and Education Center



Agricultural Research, Education
and Extension Organization

Investigation and Identification of Desert Pavements in Semnan Township using Images of the ETM⁺ Sensor

Harir Sohrabi¹, Hayedeh Ara^{2*}, Mohammadkia Kianian³, Amin Salehpour Jam⁴

1- M.Sc. Graduate, Combat Desertification Department, Desert Studies Faculty, Semnan University, Semnan, Iran

2- Assistant Professor, Arid Land Management Department, Desert Studies Faculty, Semnan University, Semnan, Iran

3- Assistant Professor, Combat Desertification Department, Desert Studies Faculty, Semnan University, Semnan, Iran

4- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

The process of identifying landforms is a subject that has been studied by many researchers. All geomorphological definitions are based on the study and identification of landforms. Understanding landforms and their distribution is a fundamental need of applied geomorphology and other environmental sciences. In this regard, remote sensing technology, due to the production of satellite images with high spatial and spectral resolution, can be a valuable tool for identifying and classifying landforms. Desert pavement is one of the most important landforms in arid and desert regions. Mapping pavements and their types provides a basis for evaluating the region in terms of its structural and geomorphological characteristics, which is useful in many environmental management and planning issues and can be used as a model for similar regions. In this research, using ETM⁺ sensor data and based on the considered criteria, the characteristics of desert pavements in Semnan township were identified and classified.

Article Type: Research Article

*Corresponding Author E-mail: ara338@semnan.ac.ir

Citation: Sohrabi, H., Ara, H., Kianian golafshani, M.K., Salehpour jam, J. 2025. Investigation and Identification of Desert Pavements in Semnan Township using Images of the ETM⁺ Sensor. Watershed Management Research. 37 (4): 15-33.

DOI: 10.22092/WMRJ.2024.365469.1581

Received: 15 April 2024, **Received in revised form:** 18 May 2024, **Accepted:** 20 June 2024

Published online: 01 January 2025

Watershed Management Research, VOL.37, No.4, Ser. No:145, Winter 2024, pp. 15-33.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center

©Author(s)



Materials and Methods

The study area, with an area of 47645.98 hectares, is located in Semnan township. The geographical coordinates of the region are 28°53' to 43°53' east longitude and 20°35' to 40°35' north latitude. The aim of this study was to investigate, separate, and identify desert pavement classes as a type of desert landform using remote sensing and Landsat ETM⁺ satellite images in southern Semnan. Therefore, by conducting field surveys and sampling of the study area, the percentage of desert pavement cover density was measured and the location of each sample was recorded with GPS. Support vector machines, neural networks, spectral angle maps, spectral information divergence, and fuzzy artmaps were used to classify desert pavements in Envi 4.5 and IDRISI Selva software environments. Then, the accuracy of each classification of each method was compared with the training samples using the coefficients of complete accuracy, kappa, user accuracy, and producer accuracy. Finally, the spatial zoning map of each method was drawn in the Arc GIS 10.2 software environment.

Results and discussion

In this study, the best band combination for detecting and separating desert pavements in southern Semnan was the 6-4-3 band combination with an optimal index factor of 45.71 (OIF), which was in the mid-infrared and visible bands (VNIR + TIR). Based on the kappa coefficient, the support vector machine (85.05), fuzzy artmap (81.44), neural network (55.17), spectral angle map (53.89), and spectral information divergence (50.22) methods had the highest ability in spectral separation of different classes of desert pavements in southern Semnan, respectively. The support vector machine and fuzzy artmap classification methods obtained the highest kappa coefficients for the classes, respectively, and the lowest kappa coefficients and complete accuracy were obtained in the neural network, spectral angle map, and spectral information divergence methods, respectively. Since the classes, bands, and other conditions used were the same for all methods, the difference in accuracy depended only on the calculation instructions of the methods.

Conclusions and suggestions

Remote sensing technology, due to the production of satellite images with high spatial and spectral resolution, can be a valuable tool for identifying and classifying landforms. Preparing a map of desert pavements and their types is a basis for evaluating the region in terms of structural and geomorphological characteristics, which can be useful in many environmental management and planning issues. Therefore, it is suggested that other classification methods based on shear orientation, combined methods, frequency coverage, images from sensors with better spatial and spectral resolution, and considering characteristics such as particle diameter be used to be effective in preparing maps of desert pavement layers.

Key Words: Desert pavement, Fuzzy Art map, Semnan, Sensor ETM+, Support Vector Machine



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی

واکاوی تغییرات زمانی - مکانی شاخص‌های حدی بارش تحت تأثیر تغییر اقلیم در ایران

سپیده چوبه^۱، بهنوش فرخ‌زاده^{۲*}، ام‌البنین بذرافشان^۳، هانیه حسنونند^۴

- ۱ - دانش‌آموخته دکتری، آبخیزداری - آب، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
- ۲ - استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران
- ۳ - استاد گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
- ۴ - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

تغییر اقلیم موجب تغییر نمایه‌های حدی و افزایش شدت و فراوانی رخداد رویدادهای حدی اقلیمی می‌شود. بارش‌های سنگین در هنگام رخداد موجب آسیب گسترده به اقتصاد، محیط زیست و زندگی بشر می‌شود. براساس گزارش خطر جهانی سال ۲۰۱۹ که به‌وسیله انجمن اقتصاد جهانی (WEF) منتشر شده است، حوادث اقلیمی حدی (مانند بارش‌های حدی) و سازگار نبودن با تغییرات اقلیمی به‌عنوان خطرات برجسته در ارتباط با تأثیر بر محیط زیست و انسان شناخته شده‌اند. از این‌رو، در این پژوهش اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های سنگین در ایران بررسی شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از داده‌های بارش ۴۷ ایستگاه استفاده شد. در ابتدا، عملکرد مدل بررسی شد. سپس، داده‌های بارش با استفاده از نرم‌افزار LARS-WG و با سناریوهای مختلف و برای دوره آینده، پیش‌بینی شد. برای ارزیابی شبیه‌سازی بارش‌های حدی به‌وسیله مدل نامبرده، افزون بر مقایسه گرافیکی داده‌های مشاهده‌شده و تولیدشده هر ایستگاه در فرآیند صحت‌سنجی، شاخص‌های MD، WS و میان داده‌های شاخص‌های حدی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده محاسبه شد. سرانجام روند بارش‌های سنگین با آزمون من-کندال بررسی شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: b.farokhzadeh@malayeru.ac.ir

استناد: چوبه، س.، فرخ‌زاده، ب.، بذرافشان، ا.، حسنونند، ه. ۱۴۰۳. واکاوی تغییرات زمانی - مکانی شاخص‌های حدی بارش تحت تأثیر تغییر اقلیم در ایران. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۷ (۴): ۵۳-۳۴.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2024.364521.1565

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۷، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۳، دوره ۳۷، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۴۵، زمستان ۱۴۰۳، صفحه‌های ۳۴ تا ۵۳

© نویسندگان

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



نتایج و بحث

نتایج شبیه‌سازی بارش در دوره ۲۰۳۰-۲۰۵۰ نشان داد که تغییرات سالانه ایستگاه‌های همدید، غیریکنواخت بود. بیشترین افزایش بارش سالانه در ایستگاه بم و با سناریوی SSP5-8.5 به اندازه ۵۹/۸۱٪ (۳۲/۳۲ میلی‌متر) بود و بیشترین کاهش بارش سالانه در ایستگاه کیش و با سناریوی SSP5-8.5 به اندازه ۱۱/۶۳٪ (۱۷/۲۳ میلی‌متر) بود. بر اساس نتایج پراکنش مکانی PRCPTOT بیشترین افزایش بارش سالانه در ایستگاه یاسوج و تحت سناریوی SSP1-2.6 بود. به‌طوری‌که در این ایستگاه بارش سالانه برای دوره آینده با سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به‌ترتیب ۹۳۳/۴۹ و ۸۸۹/۳ میلی‌متر برآورد شد. همچنین، اندازه این شاخص در دوره پایه در این ایستگاه ۸۳۲/۱۹ میلی‌متر پیش‌بینی شد.

از سوی دیگر، بیشترین کاهش بارش سالانه در ایستگاه تبریز با سناریوی SSP5-8.5 به اندازه ۱۶۵/۱۱ میلی‌متر (۶۸٪) بود. نتایج بررسی تغییرات شاخص‌های حدی بارش در دوره ۲۰۳۰-۲۰۵۰ در مقایسه با ۱۹۸۲-۲۰۲۲ نشان داد بیشترین تغییرات در مناطق شمال و غرب ایران بود که شدت این تغییرات به‌ویژه با سناریوی SSP5-8.5 بیشتر بود. بیشترین کاهش شاخص Rx1day، مربوط به ایستگاه مشهد با سناریوی SSP5-5.5 و ۳۷٪ بود. بیشترین روند افزایشی مربوط به ایستگاه زنجان با سناریوی RCP8.5 بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش‌های پرشماری در سراسر جهان نشان داده‌اند که تغییرات اقلیم منجر به تغییرات شاخص‌های حدی بارش می‌شود. این تغییرات شامل کاهش دامنه بارش و تغییر الگوی بارش است. در این راستا، نتایج این پژوهش نشان داد که روند شاخص‌های حدی الگوی یکسانی نداشت و این روند در برخی ایستگاه‌های همدید افزایشی و در برخی دیگر کاهش می‌توان گفت که شدت بارش در دوره آینده و با سناریوهای اقلیمی در بیشتر ایستگاه‌های مطالعه‌شده افزایش خواهد یافت. بررسی دقیق رویدادهای حدی بارش و تأثیرات آنها بر برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری آینده در بخش‌های گوناگون ضروری است. از این رو، پیشنهاد می‌شود شبیه این پژوهش‌ها در آبخیزهای اصلی کشور در مقیاس کوچکتر و در تعداد بیشتری از ایستگاه‌ها با دیگر آزمون‌های تشخیص روند انجام شود و نتایج آن با آزمون آماری من-کندال مقایسه شود.

واژگان کلیدی: ایران، بارش سنگین، ریزمقیاس‌نمایی، سناریوی اقلیمی، مدل‌های گردش عمومی جو، CMIP6

مقدمه

پدیده دارد. تغییر اقلیم نشان‌دهنده تغییرات غیرعادی و ناهنجاری در اقلیم درون جو زمین و پیامدهای ناشی از آن در قسمت‌های گوناگون کره زمین می‌باشد (کمال و مساح‌بوانی ۲۰۱۰). بسیاری از پژوهش‌گران داخلی و خارجی به موضوع تغییر اقلیم توجه ویژه داشته و در پژوهش‌های پرشماری (پنولاس و همکاران ۲۰۱۷، هاریسون و همکاران ۲۰۱۹، واندرویل و بین تانجا ۲۰۲۱، خویی و همکاران ۲۰۲۱، نیلین و همکاران ۲۰۲۲، چن و فورد ۲۰۲۳) عامل‌ها و آثار آن را بررسی کرده‌اند. در ایران لطفی‌راد و همکاران (۲۰۲۰)، اثر تغییر اقلیم بر روند بارش فصلی را بررسی کردند. این پژوهشگران، ۲۰ ایستگاه با اقلیم‌های گوناگون در دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۷۵ انتخاب کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که روند بارش در دوره ۲۰۵۴-۲۰۲۵ در فصل‌های گوناگون کاملاً متفاوت بود، به‌ویژه در فصل بهار با حذف ایستگاه‌های آبادان و شهرکرد، این روند نزولی بود. همچنین، در فصل زمستان بر خلاف افزایش بارش در ایستگاه‌های اهواز، تهران، یزد و سبزوار، تغییرات زیادی در دیگر ایستگاه‌ها مشاهده نشد. ازسوی دیگر، نتایج در فصل تابستان متفاوت بود و با حذف ایستگاه تهران، روند پیش‌بینی‌ها افزایشی بود. علوی‌نیا و زارعی (۲۰۲۲) با استفاده از شاخص‌های

تغییر اقلیم یک پدیده طبیعی است که در توالی‌های زمانی بلندمدت رخ می‌دهد. پیش‌بینی می‌شود رویدادهای شدید اقلیمی مانند موج‌های گرما، خشک‌سالی، سیل و آتش‌سوزی‌های جنگلی به‌دلیل افزایش دما افزایش یابند، در حالی که انتظار می‌رود دوره‌های سرما و برف کاهش یابند (IPCC ۲۰۱۹). فعالیت‌های بشری و گازهای گلخانه‌ای سبب تشدید این پدیده و تغییر بازه زمانی توالی تغییرات اقلیمی می‌شود (محمملو و همکاران ۱۳۹۵). تغییر زمان بارش به‌دلیل نقش مهم در حیات و موجودیت بشر و دما که نوسان‌های آن با ناهنجاری‌های فراوانی در چرخه آب شناسی کره زمین همراه است، در تأمین آب مناطق خشک نقش بسیار مهمی دارند (هاریسون و همکاران ۲۰۱۹). با توجه به این‌که بیش از ۱۱٪ مساحت ایران در منطقه خشک است، بارش به‌شکل سیل یا خشک‌سالی تأثیر زیادی بر تأمین آب منطقه خواهد داشت (خورشید دوست و قویدل رحیمی ۱۳۸۳). افزایش صنایع آلاینده و انتشار گازهای گلخانه‌ای باعث افزایش دمای کره زمین شده است و این موضوع به نوبه خود بر وضعیت دیگر اجزای ساختارهای چرخه آب و هوایی تأثیرگذار است و موجب رخداد تغییراتی در اقلیم می‌شود که تفاوت‌های اساسی با روند طبیعی این

حدی داده‌های بلندمدت بارش و دما در جنوب شرق ایران روند تغییر اقلیم را تحلیل کردند. این پژوهشگران به منظور تشخیص رخداد یا نبودن رخداد تغییر اقلیم از داده‌های روزانه بارش و دما (شامل ۸ شاخص اقلیمی مربوط به بارش و ۲ شاخص مربوط به دما) ایستگاه‌های همدید زابل، زاهدان و ایرانشهر در دوره آماری ۲۰۱۵-۱۹۶۶ استفاده کردند. همچنین، این پژوهشگران از آزمون‌های من-کندال و شیب‌سن برای تعیین روند و بزرگی روند استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که در بیشتر شاخص‌ها روند معنی‌داری نبود و پدیده تغییر اقلیم با تغییرات و نوسان‌های رخ داده در منطقه پژوهشی ارتباطی نداشت. در استان کردستان، حجازی‌زاده و همکاران (۲۰۲۳) تغییرات شاخص‌های حدی دما و بارش را بر اساس سناریوهای واداشت تابشی بررسی کردند. آنها از داده‌های روزانه بارش، کمینه و بیشینه دمای ۶ ایستگاه همدید در طول دوره آماری (۲۰۱۶-۱۹۹۰) استفاده کردند و تغییرات آنها را در دوره (۲۰۶۰-۲۰۴۱) با استفاده از مدل جهانی HadGEM2 با دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 و ریزمقیاس گردانی آماری LARS-WG6 بررسی کردند. همچنین، این پژوهشگران برای بررسی روند نمایه‌های حدی اقلیمی از ۲۷ شاخص مربوط به بارش و دما و نرم‌افزار RCLimindex استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که روند بارش‌های فرین در بیشتر ایستگاه‌ها منفی، کاهش و معنادار بود. از سوی دیگر، نتایج بررسی چشم‌انداز تغییرات اقلیمی نیز نشان داد در دوره آینده اندازه بارش کاهش خواهد یافت. در چین، هونگ و ینگ (۲۰۱۹)، ویژگی‌های دما و بارش شدید سال ۲۰۱۷ را بر اساس شاخص‌های ETCCDI بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که افزایش دما در شمال چین بیشتر از جنوب چین بود و میانگین شاخص‌های حدی بارش در چین (۷ شاخص از ۱۰ شاخص حدی بارش) در سال ۲۰۱۷ در محدوده‌ای از انحراف استاندارد بود که نشان‌گر وضعیت عادی بارندگی حدی در سال ۲۰۱۷ بود. فتحیان و همکاران (۲۰۲۰)، تأثیر تغییرات شاخص‌های حدی دما و بارش ایران در دوره ۲۰۱۰-۱۹۸۱ بر تغییر اقلیم ارزیابی کردند. آنها از آزمون ناسنجه‌ای من-کندال و برآوردگر شیب‌سن برای بررسی روند داده‌های انتخاب شده استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد روند شاخص‌های گرم مانند تعداد روزهای گرم، افزایشی بود. نتایج بررسی شاخص‌های حدی بارش در بیشتر ایستگاه‌های انتخاب شده نشان داد که روند اندازه و شدت بارش کاهشی بود ولی روند تعداد روزهای خشک متوالی (CDD) افزایشی بود. همچنین، مناطق غربی، شمالی و شمال غربی ایران بیشتر تحت تأثیر تغییر اقلیم بوده‌اند. گوپتا و همکاران (۲۰۲۰)، رویدادهای باران شدید در آبریز فوقانی آبخیز رود سیرمانی در هند را بررسی کردند. نتایج تجزیه و تحلیل روند مبتنی بر من-کندال به وسیله این پژوهشگران نشان داد که روند بیشتر شاخص‌های حدی بارش در حد ناچیزی افزایشی

بود، با این حال بر اساس آزمون رتبه‌بندی ویلکاکسون، اندازه شاخص‌های بارندگی شدید تعیین شده برای دوره آینده به‌ویژه با سناریوی RCP8.5 با اندازه‌های مربوطه تعیین شده برای دوره مرجع تفاوت معنی‌داری داشتند. در جنوب شرقی آسیا، ژه و همکاران (۲۰۲۱)، تغییرات آینده شاخص‌های حدی بارش را با استفاده از مجموعه‌ای از ۱۵ مدل CMIP6 بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد تغییرات بارندگی‌های شدید مرتبط با افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در شبه جزیره هند و چین افزایش یافت. همچنین تغییرات تعداد روزهای بارندگی بسیار سنگین (R20mm) و شدت بارش روزانه نشان داد که چنین بارش‌های شدید محلی احتمالاً در مدت زمان کوتاهی رخ داده‌اند و احتمال بارش‌های شدیدتر نیز وجود دارد. کومارگوپال و همکاران (۲۰۲۲)، بارش‌های حدی ۴ شهر هند را تحت تأثیر تغییر اقلیم ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش بیانگر افزایش بارش‌های شدید در سراسر شهرهای هند در تمام دوره‌های بازگشت بود. در بنگلادش توفیق عزز و همکاران (۲۰۲۲)، تغییرات مکانی و زمانی شاخص‌های حدی بارش در سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۷ تحت تأثیر تغییرات اقلیمی را بررسی کردند. نتایج در تمام ایستگاه‌های بررسی شده در این پژوهش نشان داد که روند روزهای خشک متوالی مثبت و افزایشی بود. در حالی که روند سالانه کل بارش در ۲۱ ایستگاه منفی بود. همچنین، بیشترین اندازه بارش ۱ روزه و اندازه بارش ۵ روزه در مناطق ساحلی در طول فصل باران‌های موسمی افزایش یافت و در زمستان در بیشتر مناطق بنگلادش، کاهش یافت. کوستا و همکاران (۲۰۲۳)، تغییرات شاخص‌های حدی بارش در قاره آمریکا با تأثیر سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 بر اساس ریزمقیاس‌نمایی پویایی بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده افزایش طول دوره‌های خشک در بیشتر مناطق گرمسیری آمریکا (شمال شرق برزیل، کارائیب، شمال آمازون) و کاهش طول دوره‌های مرطوب در آمریکای مرکزی و آمازون بود. به‌طور کلی به‌جز دریای کارائیب، در دیگر مناطق فراوانی بارش‌های حدی افزایش یافت. عباس و همکاران (۲۰۲۳)، تغییرات شاخص‌های حدی بارش در جنوب آسیا را با استفاده از داده‌های گزارش ششم هیئت بین‌المللی تغییر اقلیم IPCC بررسی کردند. نتایج این پژوهش بیانگر افزایش فراوانی و شدت شاخص‌های حدی بارش با سناریوی SSP5-8.5 در پایان قرن بیست و یکم بود. همچنین، توزیع مکانی شاخص‌های حدی بارش بیانگر افزایش بیشتر شاخص‌های حدی بارش در شرق آسیای جنوبی در مقایسه با قسمت غرب آن بود.

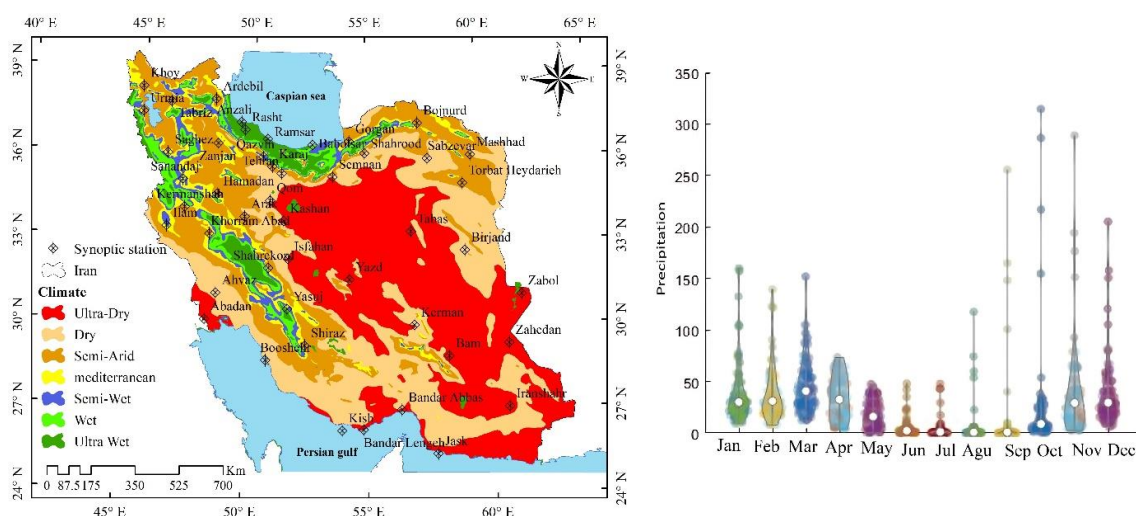
بارش‌های سنگین به دلیل اثرات ویرانگر و زیان‌بار نیاز به بررسی و مهار دارند، ایران نیز از آسیب بارش‌های سنگین مصون نیست. از سوی دیگر، به دلیل کافی نبودن بررسی بارش‌های سنگین در کشور و همچنین برنامه‌ریزی برای مهار بهتر این پدیده، در این پژوهش تلاش شد تا اثرات پدیده

میلی‌متر و کمتر از یک سوم میانگین سالانه بارش کره زمین است. مناطق گوناگون در درون کشور به دلیل موقعیت خاص خود ویژگی‌های بارشی متفاوتی دارند (علایی طالقانی، ۲۰۰۳)، به منظور بررسی، تجزیه و تحلیل اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های سنگین در کشور از آمار بارندگی ۴۷ ایستگاه همدید وابسته به سازمان هواشناسی که آمار بلندمدت در طول دوره آماری ۱۹۸۵-۲۰۲۲ داشتند، استفاده شد. نقشه موقعیت مکانی ایستگاه‌های همدید انتخاب شده (a) و نمودار ویولونی میانگین ماهانه بارش در کشور (b) در شکل ۱ نشان داده شده است.

تغییر اقلیم بر بارش‌های سنگین با استفاده از داده‌های آخرین گزارش هیئت بین‌المللی تغییر اقلیم IPCC (گزارش ششم) بررسی شود.

مواد و روش‌ها منطقه مطالعه شده

کشور ایران با مساحت ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع در ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۶۳ درجه طول شرقی است. از آنجایی که ایران در محدوده کمربند خشک جهان است، میانگین سالانه بارش در طول دوره آماری بررسی شده ۲۸۱



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های همدید انتخاب شده در ایران و نمودار ویولونی میانگین بارش ماهانه ایستگاه‌ها.

Figure 1- Location of synoptic stations in different climates of Iran and their monthly average precipitation.

(۲۰۱۹). مشخصات این شاخص‌ها در جدول ۱ آورده شده است. شاخص‌های $R25mm$ و $R10mm \cdot R20mm$ بیانگر فراوانی بارندگی‌های شدید است و شاخص‌های $R95P$ ، $R99p$ بیانگر شدت این بارندگی‌ها است. اندازه این شاخص‌ها در نرم‌افزار RclimDex در محیط R برآورد شد. از این رو، داده‌ها از دیدگاه کیفی بررسی شدند و داده‌های پرت و نامربوط از روند محاسبات حذف شدند و سرانجام شاخص‌های اقلیمی براساس داده‌های روزانه محاسبه شدند.

ارزیابی شاخص‌های حدی بارندگی

در این پژوهش، براساس بررسی‌های انجام شده برای ارزیابی شاخص‌های حدی بارندگی، هفت شاخص که به وسیله گروه کارشناسی ETCCDMI تعریف شده است، انتخاب و ارزیابی شد (جهانبخش اصل و همکاران ۲۰۱۵، کوزه‌گران و موسوی بایگی ۲۰۱۷، علوی نیا و زارعی ۲۰۲۲، جوکار و همکاران ۲۰۲۱، حجازی زاده و همکاران ۲۰۲۳، ژانگ و همکاران ۲۰۰۵، سلطانی و همکاران ۲۰۱۶، ژانگ و همکاران

جدول ۱- معرفی شاخص‌های حدی بارندگی.

Table 1- Introduction of extreme precipitation indices.

Unit	Description of the Index	Symbols
Day	The number of days in a month with precipitation greater than 10 mm.	R10mm
Day	The number of days in a month with precipitation greater than 20 mm.	R20mm
Day	The number of days in a month with precipitation greater than 25 mm.	R25mm
mm	Maximum daily precipitation.	RX1day
mm	Days with annual total precipitation exceeding the 95th percentile.	R95P
mm	Days with annual total precipitation exceeding the 99th percentile.	R99P
mm	Annual precipitation amount on wet days.	PRCPTOT

تعیین روند زمانی داده‌ها

به‌منظور بررسی روند زمانی داده‌ها از آزمون ناسنجه‌ای من-کندال استفاده شد. آزمون من-کندال نخست به‌وسیله من (۱۹۴۵) پیشنهاد شد. سپس، به‌وسیله کندال (۱۹۷۵) بر پایه رتبه داده‌ها در یک گروه زمانی گسترش یافت. آزمون من-کندال، آزمونی ناسنجه‌ای رتبه‌ای است و در تحلیل روند گروه‌های آب‌شناختی و هواشناسی به‌کار گرفته می‌شود. از مزایای این روش قابل استفاده بودن آن برای انواع داده‌های تصادفی و ناقص است. در روش من-کندال اصلی داده‌های گروه زمانی n سال برای t ایستگاه جمع‌آوری می‌شود و هر داده به‌شکل X_{igk} نشان داده می‌شود. شاخص من-کندال برای گروه داده‌ها (S_{gk}) که مجموع علامت‌های تفاضل‌های متوالی مشاهده‌ای است، در این پژوهش به‌شکل رابطه ۱ تعیین شد (پاندا و همکاران ۲۰۰۷). در این شاخص $\text{sgn}(\theta)$ تابع علامت بود و به‌شکل رابطه ۲ تعریف شد.

(۱)

$$S_{gk} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_{jgk} - X_{igk}), \forall 1 \leq i < j \leq n$$

(۲)

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta > 0 \\ 0 & \text{if } \theta = 0 \\ -1 & \text{if } \theta < 0 \end{cases}$$

I: نشانگر سال، g نشانگر ماه و k نشانگر ایستگاه است.

اگر n بزرگ‌تر یا برابر ۱۰ باشد، توزیع آماره S تقریباً به‌نجار خواهد بود (من و کندال ۱۹۷۵). در این پژوهش انحراف معیار با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد.

(۳)

$$V(S) = \frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum d(d-1)(2d+5)]}{18}$$

D: تعداد دسته‌ها با داده‌های مساوی برای گروه مشخصی از داده‌های یک ایستگاه در سال‌های گوناگون برای متغیر خاص است. در این پژوهش، S_{gk} با استفاده از رابطه ۴ به‌نجار شد (پاندا و همکاران ۲۰۰۷).

$$S'_{gk} = S_{gk} - \text{sgn}(S_{gk}) \quad (۴)$$

در این پژوهش آزمون Z استانداردشده با توزیع به‌نجار استاندارد و با میانگین صفر و واریانس ۱، با استفاده از رابطه ۵ محاسبه شد.

$$Z_{gk} = \frac{S'_{gk}}{(V(S))^{1/2}} \quad (۵)$$

در این پژوهش، نبودن روند در سطح معنی‌داری α (فرض صفر) به شرط زیر پذیرفته شد.

$$-Z_{1-\alpha/2} < Z_{gk} < Z_{1+\alpha/2} \quad (۶)$$

تعیین روند مکانی داده‌ها

تغییرات مکانی تحت تأثیر عامل‌هایی مانند پستی‌بلندی، اقلیم و نوع پوشش است. در این پژوهش، رفتار مناطق جغرافیایی از نظر شاخص‌های محاسبه‌ای بررسی شد. روش‌های معمول میان‌یابی شامل سه روش کریجینگ، کوکریجینگ و IDW است، که در این پژوهش بر اساس خطای کمتر روش در مقایسه با روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ، روش IDW استفاده شد. در روش نامبرده فرض بر این است که اندازه هم‌بستگی و تشابه میان همسایه‌ها یا فاصله میان آن‌ها متناسب است که می‌توان آن‌را به‌شکل تابعی با معکوس از فاصله هر نقطه از نقاط همسایه تعریف کرد. تعریف شعاع همسایگی و توان مربوط به تابع عکس فاصله از مسایل مهم در این روش به‌شمار می‌آید. در این روش در شرایطی که نقاط نمونه به اندازه کافی با پراکنش مناسب در سطوح مقیاس محلی باشد، استفاده می‌شوند که در این پژوهش با استفاده از رابطه ۷ مشخص شد (پورنومو

و همکاران ۲۰۱۸، ژائو و همکاران ۲۰۲۲).

$$Z_{(So)} = \sum \lambda_i \times Z_{(Si)} \quad (7)$$

$Z_{(so)}$: موقعیت نقاط مجهول، λ_i : وزن داده‌اندازه‌گیری شده در نقطه i ام، $Z_{(si)}$: داده‌های اندازه‌گیری شده در نقطه i ام.

مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG

در این پژوهش، از داده‌های سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 مدل گردش عمومی جو HadGEM3-GC31LL استفاده شد که با استفاده از روش ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG داده‌ها ریزمقیاس شدند.

سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به‌روز شده سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 هستند. در مدل‌های گزارش ششم، گسترش تعداد لایه‌های عمودی موجب شبیه‌سازی دقیق‌تر پوشش سپهر شده است. به این ترتیب مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG بر اساس گزینه Site Analysis واسنجی و صحت‌سنجی شد. در این پژوهش، برای ارزیابی کارایی مدل افزون بر مقایسه گرافیکی داده‌های مشاهده‌شده و تولیدشده هر ایستگاه در فرآیند صحت‌سنجی، اختلاف نسبی (RB)، میانگین اختلاف (MD) و امتیاز ویلموت (WS) میان داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده شاخص‌های حدی بارش با استفاده از رابطه‌های ۸، ۹ و ۱۰ محاسبه شد (خویی و همکاران، ۲۰۲۱).

$$RB = \frac{\sum_{n=1}^N (Sim_n - Obs_n)}{\sum_{n=1}^N |Obs_n|} \quad (8)$$

$$MDs = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (Sim_n - Obs_n) \quad (9)$$

$$WS = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (Sim_n - Obs_n)^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (|Sim_n - \overline{Obs_n}| + |Obs_n - \overline{Obs_n}|)^2} \quad (10)$$

Sim: اندازه‌های شبیه‌سازی‌شده به‌وسیله روش LARS-WG، Obs: اندازه‌های مشاهده‌شده و Obsavg: میانگین اندازه‌های مشاهده‌شده، N: تعداد اندازه‌های

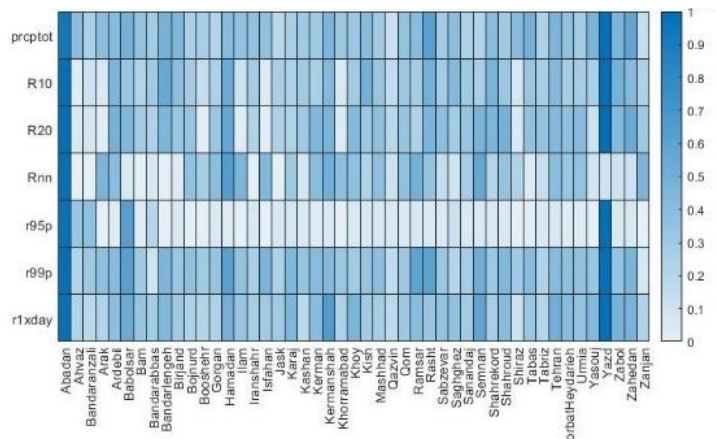
مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده است. میانگین اختلاف (MD) برای مقایسه مستقیم میان شاخص‌های حدی بارش مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده به‌کار می‌رود. اختلاف نسبی (RB) برای اندازه‌گیری تفاوت‌های نسبی میان داده‌ها استفاده می‌شود و برای تعیین صحت زیاد یا کم شبیه‌سازی است.

اندازه‌های $RB \leq \pm 25\%$ نشان‌دهنده عمل‌کرد قابل قبول مدل است و اگر اندازه MDs نزدیک به صفر باشد نشان‌دهنده عمل‌کرد ایده‌آل مدل است (موریاسی و همکاران ۲۰۱۵). امتیاز ویلموت (WS) یا شاخص توافق، که اندازه آن میان ۰ تا ۱ متغیر است، نشان‌دهنده تطابق اندازه‌های شبیه‌سازی‌شده با اندازه‌های مشاهده‌شده است. اگر اندازه WS میان صفر تا ۰/۳ باشد، نشان‌دهنده عمل‌کرد ضعیف مدل است. اگر اندازه WS میان ۰/۳ تا ۰/۸ باشد، نشان‌دهنده عمل‌کرد قابل قبول مدل است. اگر اندازه WS میان ۰/۸ تا ۱ باشد، نشان‌دهنده عمل‌کرد عالی مدل در شبیه‌سازی متغیر مدنظر است.

نتایج

ارزیابی مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG

برای بررسی عمل‌کرد مدل LARS-WG برای تولید شاخص‌های حدی بارش در دوره پایه ۱۹۸۵-۲۰۲۲ از آماره‌های خطاسنجی اختلاف نسبی (RB)، میانگین اختلاف (MD) و امتیاز ویلموت (WS) استفاده شد. از آنجایی که امتیاز ویلموت در بیشتر ایستگاه‌ها بیشتر از ۰/۳ بود، نتایج عمل‌کرد مناسب مدل LARS-WG را در تولید شاخص‌های حدی بارش نشان داد. نمودار حرارتی امتیاز ویلموت میان شاخص‌های حدی بارش مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۲۲) در شکل ۲ نشان‌داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده فقط در تعداد کمی از ایستگاه‌های مطالعه‌شده میان اندازه‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده تفاوت آماری معنی‌دار وجود داشت. نتایج آماره‌های خطاسنجی در جدول ۲ آورده‌شده است.



شکل ۲- نمودار حرارتی امتیاز ویلموت میان شاخص‌های بارش مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده.

Figure 2- Heat map between observed and simulated extreme precipitation indices.

جدول ۲- اندازه‌های شاخص‌های خطاسنجی میان اندازه‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در دوره پایه.

Table 2- Relative bias (%) and mean differences between simulation-based and observation-based extreme indices during the baseline period.

Station	R99P(mm)		R95P(mm)		RX1day(mm)		Rnmm(day)		R20mm(day)		R10mm(day)		PRCPTOT (mm)	
	MDs	RB	MDs	RB	MDs	RB	MDs	RB	MDs	RB	MDs	RB	MDs	RB
Ahmadan	-2.46	0.24	0.00	-0.75	-20.68	-0.46	20.47	0.00	0.46	-0.27	0.49	-0.12	20.08	-0.14
Ahvaz	-2.85	0.14	0.00	0.19	-30.90	-0.86	-10.05	0.00	-1.15	0.43	-3.24	0.49	-68.78	0.35
Anzali	-69.62	0.36	-0.05	0.04	-1.02	-0.91	-19.69	1.00	-0.55	0.02	0.75	-0.02	45.42	-0.03
Arak	-19.72	0.24	-24.99	0.00	-6.69	-0.17	-2.63	0.87	-2.66	0.97	-2.87	0.32	-11.31	0.04
Ardebil	-10.70	0.22	-3.14	-0.50	-4.96	-0.17	0.03	0.18	-0.53	0.44	-0.61	0.09	-24.28	0.09
Babol	-42.53	-0.02	0.00	0.36	0.70	0.01	-77.33	0.00	-0.11	0.01	0.11	0.01	0.24	0.02
Bam	-0.99	0.00	0.00	0.06	-4.09	-0.22	0.03	-0.50	-0.18	1.17	-0.37	0.26	-12.45	0.24
Bandarabaz	-3.14	0.00	0.00	-0.45	2.81	0.06	21.93	0.00	-0.13	0.05	-0.47	0.09	-8.95	0.06
Bandarlanghe	-19.46	0.00	0.03	-1.00	-4.96	-0.12	39.83	-1.00	-0.08	0.04	0.03	-0.01	-4.34	0.04
Birjand	1.86	-0.72	4.55	-0.07	-0.15	-0.01	0.00	0.00	-0.08	0.10	0.26	-0.06	2.86	-0.02
Bojnord	-31.54	0.60	-6.21	1.03	-2.77	-0.11	0.37	-0.93	-0.21	0.19	0.13	-0.02	-4.64	0.02
Boshehr	-17.16	0.22	-10.51	0.25	-2.35	-0.05	-2.63	0.00	-2.39	-0.09	-2.55	-0.02	0.68	-0.04
Esfehan	-29.42	0.29	-12.83	0.26	-12.68	-0.23	0.00	0.00	0.16	-0.03	-0.05	0.00	-5.36	0.01
Gorgan	8.60	0.85	-12.58	-0.15	0.81	0.03	0.03	-0.50	0.42	-0.19	1.63	-0.19	50.91	-0.17
Hamedan	-1.48	0.34	26.14	-0.01	-16.83	-0.23	0.00	0.00	0.03	0.00	0.94	0.05	6.89	0.01
Ilam	0.73	0.00	0.00	-0.02	-1.97	-0.07	0.00	0.00	0.08	-0.06	-0.32	0.10	-8.27	0.08
Iranshahr	0.52	0.77	-9.95	-0.11	-2.97	-0.14	-2.66	-1.00	-2.26	-0.44	-2.02	-0.20	7.65	-0.11
Jask	30.41	0.00	0.00	-0.50	-6.15	-0.14	0.00	0.00	-0.26	0.16	-0.55	0.16	-11.81	0.11
Karaj	-56.36	0.04	46.83	-0.15	-15.85	-0.56	1.39	0.00	5.61	0.07	0.42	-0.06	-7.01	0.03
Kashan	1.65	-0.35	1.51	-0.07	-0.06	0.00	0.00	0.00	0.08	-0.14	-0.18	0.05	-3.43	0.03
Kerman	-1.94	-0.30	2.93	0.08	-0.30	-0.01	0.03	-0.50	-0.08	0.12	-0.03	0.01	-2.58	0.02
Kermanshah	-20.05	1.29	-33.88	0.21	-1.90	-0.04	0.00	0.00	0.08	-0.02	-0.11	0.01	-12.23	0.03
Korambad	5.69	-0.11	-3.69	0.06	-6.42	-0.13	0.00	0.00	0.24	0.04	-0.46	-0.03	-1.42	0.00
Khoy	6.23	1.15	-15.26	-0.11	-2.06	-0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	-0.16	10.11	-0.04
Kish	-20.77	0.00	-7.49	0.58	-2.70	-0.06	0.00	0.00	0.61	-0.25	0.58	-0.13	11.11	-0.08
Mashhad	-24.11	0.00	-7.66	0.67	12.80	0.44	0.00	0.00	0.34	-0.14	-2.95	0.64	-100.71	0.68
Gazvin	21.27	-0.37	5.41	-0.30	1.18	0.04	0.00	0.00	0.03	-0.01	0.89	-0.09	7.51	-0.02
Gom	-11.10	1.15	-7.87	0.50	-2.08	-0.10	0.00	0.00	-0.19	0.33	0.05	-0.02	-5.45	0.04
Ramsar	-86.61	0.93	-109.10	0.19	-11.77	-0.07	0.00	0.00	-0.05	0.00	1.26	-0.04	-32.77	0.03
Rasht	28.91	0.26	-25.81	-0.09	3.20	0.04	0.00	0.00	1.13	-0.05	2.39	-0.06	60.66	-0.05
Sabzevar	-1.73	-0.49	6.83	0.05	-4.97	-0.18	0.00	0.00	-0.32	0.31	-0.13	0.02	-12.75	0.07
Saghez	43.69	-0.84	31.24	-0.40	1.03	0.03	-0.03	1.00	0.76	-0.17	0.71	-0.05	28.02	-0.06
Sanandaj	8.70	0.16	-3.28	-0.09	-0.81	-0.02	0.00	0.00	0.26	-0.07	1.03	-0.08	18.66	-0.05
Semnan	5.36	0.50	-0.98	-0.20	-1.48	-0.07	0.00	0.00	-0.18	0.35	0.05	-0.01	-1.77	0.01
Shahrkord	-21.18	-0.22	3.90	0.33	-1.31	-0.03	0.00	0.00	0.24	-0.07	0.66	-0.06	9.32	-0.03
Shiroud	10.00	-0.57	7.44	-0.31	-1.42	-0.06	0.00	0.00	-0.08	0.09	-0.08	0.02	-2.93	0.02
Shiraz	28.26	0.17	2.48	0.75	-1.42	-0.09	-0.03	-1.00	-0.35	-0.07	-0.62	-0.06	-18.68	-0.06
Tabas	-2.12	-0.67	4.28	0.11	-1.61	-0.10	0.08	-0.75	-0.08	0.30	0.21	-0.10	-3.50	0.05
Tahriz	-4.86	0.31	2.92	-0.12	-1.00	-0.04	0.00	0.00	-0.11	-0.12	-0.16	-0.02	-0.83	0.00
Tehran	6.19	0.55	10.07	0.14	0.44	0.09	0.03	0.33	0.13	0.08	-0.11	-0.02	4.69	0.02
Torbatheydarye	-7.30	-0.30	6.78	0.16	-0.25	-0.10	0.03	-0.50	-0.61	0.29	-1.16	0.15	-34.55	0.15
Urmia	20.12	-0.60	15.14	-0.23	-2.60	-0.07	0.03	-0.50	-0.29	0.11	0.21	-0.02	-0.89	0.00
Yasoj	26.09	-0.53	17.35	-0.24	-1.06	-0.20	0.00	0.00	-0.26	0.02	-0.47	0.02	-56.05	0.07
Yazd	3.79	-0.09	3.35	0.07	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.02	0.11	0.12	-0.01	0.62	0.02
Zabool	-1.37	0.00	0.00	0.27	-0.15	-0.09	0.00	0.00	-0.08	0.33	0.03	-0.02	1.06	-0.02
Zahedan	11.45	0.00	0.00	-0.49	-0.25	-0.01	0.00	0.00	-0.03	0.08	0.18	-0.09	6.68	-0.10
Zanjan	-18.80	0.25	2.72	-0.30	-0.69	-0.20	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	15.52	0.06

ایستگاه‌های رشت، گرگان، ایران‌شهر، سمنان، سبز و زابل بود. اندازه‌های $RB \leq \pm 25\%$ نشان‌دهنده عمل کرد قابل قبول مدل است. از این‌رو، نتایج شاخص PRCPTOT نشان‌دهنده دقت زیاد مدل بود و در ۴۴ ایستگاه مدل دقت خوبی داشته است. همچنین، شبیه‌سازی شاخص R10mm در ۸۳٪ از ایستگاه‌های مطالعه‌شده قابل قبول بود. در حالی که شبیه‌سازی شاخص R95P فقط در یک سوم از ایستگاه‌ها قابل قبول بود. بر اساس نتایج شاخص PRCPTOT، بیشترین اندازه MD در ایستگاه مشهد به دست آمد، در حالی که کمترین اندازه‌های MD در ایستگاه بابل به دست آمد. بر اساس اندازه MD بیشترین تطابق میان داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده برای شاخص‌های R10mm و R20mm بود، در حالی که عمل کرد مدل در شاخص R95P و R99P مناسب نبود. باید توجه داشت که بر اساس نتایج جدول ۲ و شکل ۳ اندازه‌های زیاد WS همیشه نشان‌دهنده تفاوت کم میان شاخص‌های حدی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده نیست و در برخی ایستگاه‌ها به‌رغم اندازه‌های زیاد WS، اندازه‌های RB و MD کم بود. از این‌رو، عمل کرد مدل‌ها مناسب نبود. در مجموع اندازه‌های آماره‌های خطاسنجی نشان داد که مدل‌ها در ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بارش و پیش‌بینی شاخص‌های حدی بارش عمل کرد مناسبی داشتند. فرخ‌زاده و همکاران

نتایج امتیاز ویلموت در همه شاخص‌ها به‌جز R95P، میان اندازه‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌شده تطابق خوبی را نشان داد که اندازه‌های WS آن‌ها برای کل منطقه بیش از ۰/۳ بود (۰/۳۱ تا ۱/۰۰)، در حالی که عمل کرد شاخص R95P در مقایسه با دیگر شاخص‌ها مطلوب نبود و فقط اندازه‌های WS مناسب (۰/۳۳ تا ۱/۰۰) در ۵ ایستگاه آبادان، اهواز، بندر انزلی، بابل و یزد از ۴۷ ایستگاه در منطقه مطالعه‌شده به‌دست آمد. افزون بر این، اندازه RB نشان داد که شاخص‌ها در بیشتر مناطق، کمتر از حد مشاهده‌شده، برآورد شده‌اند. بیشترین اندازه WS در ایستگاه یزد مربوط به شاخص‌های PRCPTOT، R99P، R10mm، RX1day و R20mm بود، در حالی که کمترین اندازه‌های WS به‌ترتیب در ایستگاه‌های قزوین، شیراز، آبادان، بوشهر و زنجان به‌دست آمد. بر اساس اندازه WS بیشترین تطابق میان داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده مربوط به شاخص PRCPTOT بود، در حالی که عمل کرد مدل در شاخص R95P مناسب نبود و کمترین اندازه WS در ایستگاه‌های اراک، بجنورد، بوشهر، ایلام، اصفهان، خرم‌آباد، یاسوج و زنجان به‌دست آمد. از این‌رو، این شاخص در ادامه بررسی‌ها حذف شد. نتایج مقایسه اندازه‌های RB در ایستگاه‌های گوناگون، نشان داد که بیشترین دقت مدل در شبیه‌سازی شاخص‌های حدی بارش در

خواهد یافت. همچنین، ایستگاه‌هایی که بارش بیشتری داشتند (ایستگاه‌های رامسر و رشت) شیب کاهشی بیشتری نیز داشتند. از سوی دیگر، افزایش این شاخص نشان‌دهنده افزایش مجموع بارندگی سالانه در مقایسه با روزهای مرطوب است. بنابراین، مجموع بارش سالانه در ایستگاه‌های اردبیل، بندرعباس، بندر لنگه، بیرجند، بجنورد، بوشهر، اصفهان، همدان، ایلام، ایرانشهر، جاسک، خرم‌آباد، کیش، مشهد، قم، سبزوار، شهرکرد، شاهرود، شیراز، یزد، زابل و زنجان افزایش خواهد یافت. همچنین، ایستگاه‌های یاسوج، خرم‌آباد و شیراز شیب افزایشی بیشتری داشتند. روندهای معنی‌دار افزایشی و کاهشی به‌ترتیب ۲۵/۵۳٪ و ۲۷/۶۶٪ از کل روندها را تشکیل دادند. دیگر شاخص‌ها نیز روندهای معنی‌دار داشتند، اما سهم آن‌ها کمتر از ۳۰٪ بود. نتایج این پژوهش با یافته‌های جهان‌بخش اصل و همکاران (۲۰۱۵)، کوزه‌گران و موسوی‌بایگی (۲۰۱۵)، علوی‌نیا و همکاران (۲۰۲۲)، جوکار و همکاران (۲۰۲۱)، زند و همکاران (۲۰۲۳)، اسکندری و همکاران (۲۰۲۴)، فتحیان و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد. در پژوهشی رحیم‌زاده (۲۰۰۶) تغییرات اندازه‌های حدی بارش در ایران را بررسی کرد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که روند شاخص‌های بارش در کشور مانند دیگر نقاط دنیا از الگوی یکسانی پیروی نمی‌کند و این روند در برخی مناطق افزایشی و در برخی مناطق کاهشی بود و فاصله از منابع رطوبتی و موقعیت جغرافیایی از عامل‌های مؤثر بر تغییرات شاخص PRCPTOT بود.

(۲۰۱۸)، عسکری‌زاده و همکاران (۲۰۱۸)، گودرزی و چوبه (۲۰۱۹)، محمدی و همکاران (۲۰۱۷)، کاظمی‌راد و مدبری (۲۰۲۳) گزارش کردند که عمل‌کرد مدل LARS-WG در ریزمقیاس نمایی و شبیه‌سازی داده‌های بارش مناسب بوده است.

ارزیابی اندازه‌های شاخص‌های حدی در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۲۲)

اندازه‌های میانگین سالانه شاخص‌های حدی بارش و شیب میانگین روند زمانی هر شاخص در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۲۲) در ایستگاه‌های مطالعه‌شده در جدول ۳ آورده شده است. به‌طور کلی، روند بیشتر شاخص‌های حدی بارش در بیشتر ایستگاه‌های مطالعه‌شده در دوره نامبرده کاهشی بود. شاخص PRCPTOT بیانگر اندازه سالانه بارش در روزهای تر است. از این‌رو، در این پژوهش کاهش این شاخص نشان‌دهنده کاهش مجموع بارندگی سالانه در مقایسه با روزهای مرطوب و خشک‌سالی بود. نتایج شاخص حدی PRCPTOT نشان داد که حدود ۵۰٪ از تغییرات این شاخص معنی‌دار بود. بر این اساس نیمی از ایستگاه‌های هم‌دید منتخب در دوره آماری ۱۹۸۵-۲۰۲۲ با پدیده خشک‌سالی مواجه خواهند بود. بنابراین مجموع بارش سالانه در ایستگاه‌های آبادان، اهواز، اراک، بابل‌سر، بم، گرگان، کرج، کرمانشاه، خوی، رامسر، طیس، تبریز، تهران، تربت حیدریه، ارومیه، زاهدان، قزوین، سقز، سنندج، سمنان، کاشان، کرمان، کرمانشاه، رشت و بندر انزلی کاهش

جدول ۳- میانگین سالانه و روند شاخص‌های حدی بارش در ایستگاه‌های همدید ایران در دوره ۲۰۲۲-۱۹۸۵.

Table 3- Mean annual values of extreme precipitation indices and the corresponding averaged slope of trend at each station during the historical period of 1987-2022 in Iran.

Station	RX1day(mm)		Rnnmm(day)		R99p(mm)		R20mm(day)		R10mm(day)		PRCPTOT (mm)	
	Slope	Mean	Slope	Mean	Slope	Mean	Slope	Mean	Slope	Mean	Slope	Mean
Abadan	-1.97	34.78	0.00	0.03	-2.61	10.56	-0.12	1.71	-0.09	4.15	-5.52	144.19
Ahvaz	3.78	17.45	0.00	0.03	-1.27	19.92	0.00	2.68	0.00	6.59	-0.27	197.03
Anzali	4.56	10.74	2.70	-49.92	2.70	51.49	3.32	-35.29	3.89	-25.74	4.55	825.89
Arak	0.03	35.72	0.00	6.42	1.52	66.37	0.03	2.78	0.03	9.05	-0.19	294.64
Ardebil	0.21	24.23	0.00	17.54	1.31	48.36	0.05	1.18	0.05	6.53	1.75	255.74
Babolisar	0.14	85.14	0.00	0.03	0.00	65.22	-0.16	14.16	0.11	28.32	-0.92	892.40
Bam	-0.30	14.58	0.00	0.00	-0.62	16.32	-0.03	0.16	-0.03	1.39	-0.38	51.33
Bandarabas	1.11	48.55	0.00	0.03	0.00	0.00	0.08	2.53	0.11	5.00	4.96	162.02
Bandarlengh	1.70	35.45	0.00	0.03	0.00	0.00	0.05	1.79	0.08	4.13	3.29	119.16
Birjand	0.08	21.19	0.00	6.33	0.00	26.81	0.00	0.76	0.03	4.58	0.28	145.45
Bojnord	0.07	23.29	0.00	10.28	0.00	30.74	0.00	1.11	0.05	6.16	1.01	235.33
Boshehr	0.16	48.84	0.00	23.00	0.16	40.74	0.08	1.37	0.05	4.79	1.71	240.37
Esfahan	1.44	43.39	2.22	44.03	1.81	113.37	-0.05	5.42	-0.05	15.63	0.76	490.21
Gorgan	-0.63	31.67	0.00	14.88	-0.95	56.09	-0.03	2.24	-0.16	8.55	-2.55	295.68
Hamedan	0.68	27.69	3.81	120.27	2.78	-2.67	3.03	14.89	10.96	528.37	0.27	72.57
Ilam	0.27	26.71	0.00	0.00	2.05	36.11	0.08	1.24	0.11	3.32	2.72	100.20
Iranshahr	0.05	18.50	0.00	6.87	0.00	25.46	0.00	-1.79	0.03	0.66	0.73	114.68
Jask	0.26	37.03	0.00	0.00	0.00	60.72	0.05	1.63	0.14	3.37	2.55	112.48
Karaj	-0.22	12.57	-1.78	66.36	0.00	0.03	-0.08	7.13	-0.08	7.13	-2.41	242.01
Kashan	-0.34	19.43	0.00	4.36	-0.46	24.30	0.00	0.58	-0.03	3.39	-0.88	120.93
Kerman	-0.35	21.00	-0.78	9.80	-0.78	24.32	-0.03	0.68	0.05	3.37	-0.37	120.04
Kermanshah	-0.19	43.55	0.00	26.31	-1.05	94.74	-0.05	4.71	-0.19	13.34	-4.95	407.32
Koramabad	3.48	44.59	2.70	30.69	2.70	96.03	2.78	3.95	2.97	12.92	10.84	459.60
Khoy	-0.56	25.89	-1.05	13.31	-1.29	58.62	-0.05	1.29	-0.05	7.45	-2.18	254.33
Kish	0.27	42.18	0.00	0.00	0.00	35.78	0.03	2.39	0.08	4.63	2.26	147.03
Mashhad	0.27	42.18	0.00	0.00	0.00	35.78	0.03	2.39	0.08	4.63	2.26	147.03
Gazvin	-0.12	29.09	0.00	14.77	-0.66	71.40	-0.03	2.26	-0.11	9.50	-2.54	301.23
Gom	3.19	13.73	2.70	1.24	3.19	15.89	2.70	-4.71	2.75	-2.05	5.10	122.23
Ramsar	-2.11	151.48	-4.81	117.25	-8.00	464.94	-0.16	16.13	-0.30	31.00	-8.51	1229.64
Rasht	-2.84	92.93	-8.67	98.80	-10.32	317.87	0.03	20.97	-0.05	40.50	-10.05	1300.42
Subzevar	-0.20	10.04	0.00	34.08	0.00	0.03	0.00	5.97	-0.51	175.63	0.01	27.51
Saghez	-0.30	40.21	-1.05	37.20	-1.36	110.43	-0.05	4.58	-0.08	14.92	-3.65	446.74
Sanandaj	0.32	38.08	0.00	20.84	0.41	95.38	-0.03	3.82	-0.43	12.84	-5.50	377.61
Semnan	-0.16	20.98	0.00	1.98	0.00	26.68	0.00	0.53	-0.05	3.63	-1.38	128.71
Shahrkord	-0.19	38.47	0.00	17.55	-0.30	64.70	0.05	3.50	0.22	11.00	2.19	308.87
Shrood	-0.19	21.81	0.00	13.09	-0.46	32.21	0.00	0.84	-0.03	3.74	0.01	143.17
Shiraz	3.62	41.19	2.70	11.33	2.70	33.89	2.84	1.95	2.94	7.37	9.44	300.30
Tabas	0.06	14.32	0.00	6.41	0.39	18.54	0.00	0.26	0.00	2.03	-0.29	75.91
Tabriz	0.15	22.51	0.00	9.35	0.00	39.96	0.00	0.89	0.00	6.53	-2.17	242.87
Tehran	-0.12	26.30	0.00	18.46	-0.57	45.59	-0.03	1.58	-0.08	6.74	-2.21	226.71
Torbatheydarye	-0.14	29.54	0.00	22.84	-0.70	44.84	-0.03	2.05	-0.05	7.95	-2.17	236.18
Urmia	-0.05	33.77	0.00	25.38	-0.58	86.40	-0.03	2.58	-0.03	9.37	-1.08	301.91
Yasoj	4.27	62.46	2.70	21.37	2.70	89.82	2.97	4.40	3.35	13.43	20.69	712.99
Yazd	1.08	13.82	0.00	0.00	1.30	12.97	0.03	0.16	0.03	1.13	1.31	49.57
Zabool	0.36	13.46	0.00	0.00	0.00	5.08	0.00	0.24	0.03	1.24	0.98	48.08
Zahedan	0.05	17.93	0.00	0.00	-0.81	23.22	0.00	0.34	-0.08	2.08	-1.27	70.27
Zanjan	3.24	-38.56	2.70	-9.52	3.73	33.51	2.73	-17.27	2.81	-12.64	7.94	188.66

ارزیابی تغییرات اندازه بارش

مختلف در ایستگاه‌های زاهدان، شهرکرد، سقز، رامسر، قم، کیش، کرمانشاه، خرم‌آباد، کاشان، ایلام، بجنورد و اراک متفاوت بود. همچنین، بیشترین افزایش بارش در ایستگاه بم و با سناریوی SSP5-8.5 و به اندازه ۵۹/۸۱٪ (۳۲/۳۲ میلی‌متر) و کمترین افزایش بارش در ایستگاه سقز و با سناریوی SSP1-2.6 و به اندازه ۰/۳۳٪ (۱۵/۰ میلی‌متر) بود، در حالی که بیشترین کاهش بارش سالانه در ایستگاه کیش و با سناریوی SSP5-8.5 و به اندازه ۱۱/۶۳٪ (۱۷/۲۳ میلی‌متر) و کمترین افزایش بارش در ایستگاه کاشان و با سناریوی SSP5-8.5 و به اندازه ۰/۵۵٪ (۰/۶۷ میلی‌متر) بود. نتایج پژوهش‌ها نشان داده‌اند که اثر تغییر اقلیم بر بارش مناطق گوناگون و با سناریوهای متفاوت، متفاوت است (بذرافشان مقدم ۲۰۱۶، دولابیان ۲۰۱۷، توانگر و همکاران ۲۰۱۹).

نتایج بارش شبیه‌سازی‌شده ایستگاه‌های همدید کشور برای دوره مشاهده‌ای و دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۵۰) با سناریوهای اقلیمی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 در جدول ۴ آورده شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات بارش سالانه در ایستگاه‌های همدید کشور یکنواخت نبود (جدول ۴). در هر دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 بارش در ایستگاه‌های آبادان، اهواز، بندر انزلی، اردبیل، بابلسر، بم، بندر عباس، بندرلنگه، بیرجند، بوشهر، گرگان، همدان، ایرانشهر، جاسک، کرج، کرمان، مشهد، قزوین، سبزوار، سمنان، شاهرود، شیراز، طبس، تبریز، تهران، تربت حیدریه، یاسوج، یزد، زابل و زنجان افزایش یافت. در ایستگاه‌های اصفهان، خوی، رشت، سنندج و ارومیه بارش سالانه در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۲۲) و با هر دو سناریو کاهش یافت. نتایج سناریوهای

جدول ۴- بارش سالانه مشاهده شده و شبیه سازی شده با سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5.

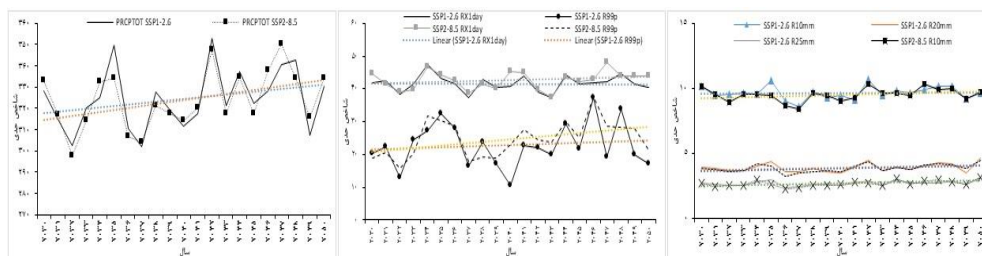
Table 4- Observed and simulated annual precipitation under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios.

Station	Future Period		Base period	
	SSP5-8.5	SSP1-2.6	Simulated	Observed
Abadan	174.08	188.39	154	146.84
Ahvaz	169.29	154.83	150.25	146.84
Anzali	1671.97	1770.73	1689.36	1566.1
Arak	283.13	311.26	293.35	300.28
Ardebil	304.72	321.15	270.64	269.36
Babolsar	918.47	970.8	910.55	900.58
Bam	81.2	86.36	57.94	54.04
Bandarabas	213.95	245.25	152.61	163.82
Bandarlenghe	137.91	170.8	131.78	120.13
Birjand	153.48	160.09	144	150.49
Bojnord	227.78	247.75	256.59	246.65
Boshehr	318.4	314.37	261.78	250.19
Esfahan	517.58	570.8	522.25	500.55
Gorgan	236.23	252.59	279.05	231.39
Hamedan	510.13	579.71	540.67	550.62
Ilam	119.04	128.15	114.64	102.47
Iranshahr	108.29	114.73	122.63	119.66
Jask	120.04	130.37	103.51	113.31
Karaj	254.83	276.15	248.35	249.34
Kashan	121.5	136.84	125.49	122.17
Kerman	136.05	140.44	124.65	124.66
Kermanshah	394.88	436.29	428.41	402.4
Korramabad	448.43	500.86	474.26	476.53
Khoy	249.13	257.98	269.53	264.06
Kish	130.86	166.01	155.59	148.09
Mashhad	277.8	291.06	241.68	241.41
Gazvin	323.83	347.16	301.56	309.03
Gom	134.96	151.9	149.8	143.72
Ramsar	1193.21	1250.73	1311.32	1239.95
Rasht	1231.57	1300.01	1329.5	1309.27
Sabzevar	197.52	215.29	176.71	183
Saghez	404.7	453.6	468.15	453.45
Sanandaj	341.76	377.7	379.51	384.22
Semnan	144.68	161.3	131.3	118.75
Shahrekord	280.93	300.46	331.36	291.03
Shhrod	162.24	180.67	156.54	150.37
Shiraz	349.7	347.08	358.48	313.99
Tabas	83.81	86.87	85.19	79.85
Tabriz	274.31	292.18	266.81	253.63
Tehran	235.47	264.23	236.02	233.5
Torbatheydariye	298.41	305.56	182.005	242.64
Urmia	283.7	309.31	317.78	309.81
Yasoj	887.95	931.61	753.49	781.87
Yazd	59.32	64.31	50.18	53.82
Zabool	52.5	58.05	53.11	51
Zahedan	68.62	76.91	75.28	73.6
Zanjan	299.92	325.39	308.15	265.77

بررسی شده برای منطقه مطالعه شده، روند افزایشی خواهند داشت. از آنجایی که این نمودار فقط روند کلی شاخص های حدی از ابتدا تا انتهای دوره ۲۰۳۰-۲۰۵۰ را نشان می دهد، نمی تواند ابزار مناسبی برای بررسی و مقایسه شاخص های حدی در دوره پایه (۲۰۲۲-۱۹۸۵) و دوره آینده باشد. از این رو، میانگین هر شاخص محاسبه شد و سپس میانگین دوره ها برای هر ایستگاه همپید منتخب بررسی شد.

تغییرات شاخص های حدی بارش در ایستگاه های همپید ایران در دوره ۲۰۳۰-۲۰۵۰

متغیرهای کمینه دما، بیشینه دما و بارش برای دوره ۲۰۳۰-۲۰۵۰ با استفاده از مدل LARS-WG برآورد شد و سپس برای محاسبه اندازه های بارش های حدی استفاده شد. تغییرات زمانی میانگین شاخص های حدی بارش در ایران در دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۵۰) در شکل ۳ نشان داده شده است. بر این اساس، در طول دوره آماری ۲۰۳۰-۲۰۵۰ هر شش شاخص حدی



شکل ۳- تغییرات زمانی شاخص های حدی بارش در دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۵۰) در کل ایران.

Figure 3- Temporal variation of the spatially averaged extreme precipitation indices for Iran during the future period.

این پژوهش اندازه این شاخص در دوره ۲۰۳۰-۲۰۵۰ در مقایسه با دوره ۱۹۸۵-۲۰۲۲ با هر دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 در ایستگاه‌های بابلسر، بندرعباس، بندرلنگه، گرگان، ایلام، ابرانشهر، کرج، خرم‌آباد، قزوین، سمنان، شیراز، تربت حیدریه، یاسوج، یزد و زنجان افزایش و در ایستگاه‌های اهواز، اردبیل، بم، بیرجند، بجنورد، بوشهر، همدان، کرمان، کرمانشاه، مشهد، قم، رامسر، سبزوار، سمنان، شاهرود، طبریز، تبریز، تهران، ارومیه، زابل و زاهدان کاهش خواهد داشت. عمل‌کرد سناریوها در ایستگاه‌های بندرانزلی، اراک، اصفهان، جاسک، کاشان، خوی، کیش، رشت و سقز متفاوت بود. بیشترین افزایش شاخص R10mm در ایستگاه بندرانزلی و با سناریوی SSP5-8.5 بود. به‌طوری‌که در این ایستگاه اندازه R10mm برای دوره آینده با سناریوی SSP5-8.5 برابر با ۴۵/۷۵ محاسبه شد، در حالی که در دوره پایه این شاخص ۹/۰۵ میلی‌متر بود و به اندازه ۳۶/۵۲ میلی‌متر افزایش خواهد یافت. در حالی که بیشترین کاهش بارش سالانه در ایستگاه اهواز و با سناریوی SSP5-8.5 و به اندازه ۴۴/۶۶ میلی‌متر (۹۲٪) خواهد بود. نتایج نشان داد که بیشینه این شاخص در ایستگاه‌های آبخیز دریای خزر و کمینه آن در مناطق جنوب و شرق ایران بود. ایستگاه‌هایی که مجموع سالانه بارش بیشتری داشتند، کاهش بیشتری در شاخص R10mm نیز خواهند داشت (شکل ۴). بر اساس این یافته‌ها می‌توان گفت در ایران بارش‌های سنگین تحت شرایط تغییر اقلیم آینده افزایش خواهند داشت. نتایج این پژوهش با یافته‌های توانگر و همکاران (۲۰۱۹) و زرین و داداشی رودباری (۲۰۲۲) هم‌راستا است. جعفرزاده (۲۰۱۶) گزارش کرد که بیشترین کاهش شاخص R10mm تحت تأثیر تغییر اقلیم در ایستگاه همدید بندرانزلی خواهد بود. درحالی‌که کوزه‌گران (۲۰۱۷) گزارش کرد کاهش اندازه شاخص R10mm با سناریوهای تغییر اقلیم در تربت حیدریه، بیرجند و طبرستان خواهد بود.

مقایسه شاخص R20mm در دوره پایه و آینده

نتایج این پژوهش نشان داد که تعداد رخداد‌های حدی بیشتر از ۲۰ میلی‌متر با سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 در ایستگاه‌های اهواز، بندرانزلی، اراک، بجنورد، همدان، اصفهان، خوی و کیش کاهش یافت (شکل ۴). بیشترین کاهش اندازه شاخص در ایستگاه بندرانزلی و به اندازه ۸/۸۷٪ بود. فتحیان و همکاران (۲۰۲۰)، رحیم‌زاده و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که ایستگاه‌های شمال ایران بیشترین کاهش شاخص R20mm را داشته‌اند. در ایستگاه‌های بابلسر، ایلام، کاشان و خرم‌آباد، عمل‌کرد سناریوهای تغییر اقلیم متفاوت بود. در پژوهشی عسگری‌زاده و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند عمل‌کرد سناریوهای تغییر اقلیم در رابطه با شبیه‌سازی R20mm متفاوت بود. در حالی که در ایستگاه‌های آبادان، اردبیل، بم، بندرعباس، بندرلنگه، بیرجند، بوشهر، گرگان، ابرانشهر، جاسک، کرج، کرمان، کرمانشاه، مشهد، قزوین، قم، رامسر، رشت، سبزوار،

مقایسه شاخص PRCPTOT در دوره پایه و آینده

پراکنش مکانی مجموع بارش سالانه (PRCPTOT) مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده با سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج هر دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5، اندازه بارش سالانه در دوره ۲۰۳۰-۲۰۵۰ در ایستگاه‌های آبادان، اردبیل، بابلسر، بم، بندرعباس، بندرلنگه، بیرجند، بوشهر، گرگان، ابرانشهر، جاسک، کرمان، مشهد، قزوین، سبزوار، سمنان، شاهرود، شیراز، طبرستان، تربت حیدریه، یاسوج، یزد، زابل و زنجان افزایش خواهد یافت. از سوی دیگر، با سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 اندازه بارش سالانه در ایستگاه‌های اهواز، بجنورد، همدان، اصفهان، خوی، رامسر، رشت، سقز، سمنان، شهرکرد و ارومیه کاهش خواهد یافت. در دیگر ایستگاه‌های همدید بررسی‌شده عمل‌کرد سناریوها متفاوت بود. بیشترین افزایش بارش سالانه در ایستگاه ابرانشهر و با سناریوی SSP5-8.5 بود. به‌طوری‌که در این ایستگاه بارش سالانه برای دوره آینده با سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به‌ترتیب ۱۲۵/۳۴ و ۵۰۵/۱۱ میلی‌متر برآورد شد. بارش سالانه ایستگاه ابرانشهر در دوره پایه ۱۰۰/۲۰ میلی‌متر بود و بارش سالانه به‌ترتیب ۲۵/۱۴ و ۴۰۴/۹۱ میلی‌متر افزایش خواهد یافت. درحالی‌که بیشترین کاهش بارش سالانه در ایستگاه تبریز و با سناریوی SSP5-8.5 و به اندازه ۱۶۵/۱۱ میلی‌متر (۶۸٪) خواهد بود. با توجه به شکل ۴، ایستگاه‌هایی که بارش بیشتری داشتند، شیب کاهشی بیشتری نیز داشتند. همچنین از نظر جغرافیایی، ایستگاه‌هایی که در بخش‌های کوه‌های زاگرس بودند در مقایسه با دیگر بخش‌های کشور، روند کاهشی شدیدتری داشتند. از این‌رو، می‌توان گفت که کاهش بارش سالانه در مناطق شمال و شمال‌غربی بیشتر از بخش‌های مرکزی و جنوبی ایران است. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های محمدی و همکاران (۲۰۱۷)، عسگری‌زاده و همکاران (۲۰۱۸) هم‌راستا است. درحالی‌که کوزه‌گران (۲۰۱۷)، کاظمی‌راد و مدبری (۲۰۲۳) گزارش کردند اندازه شاخص PRCPTOT با سناریوهای گوناگون در تربت حیدریه، بیرجند، طبرستان، قزوین و کردستان کاهش یافت.

مقایسه شاخص R10mm در دوره پایه و آینده

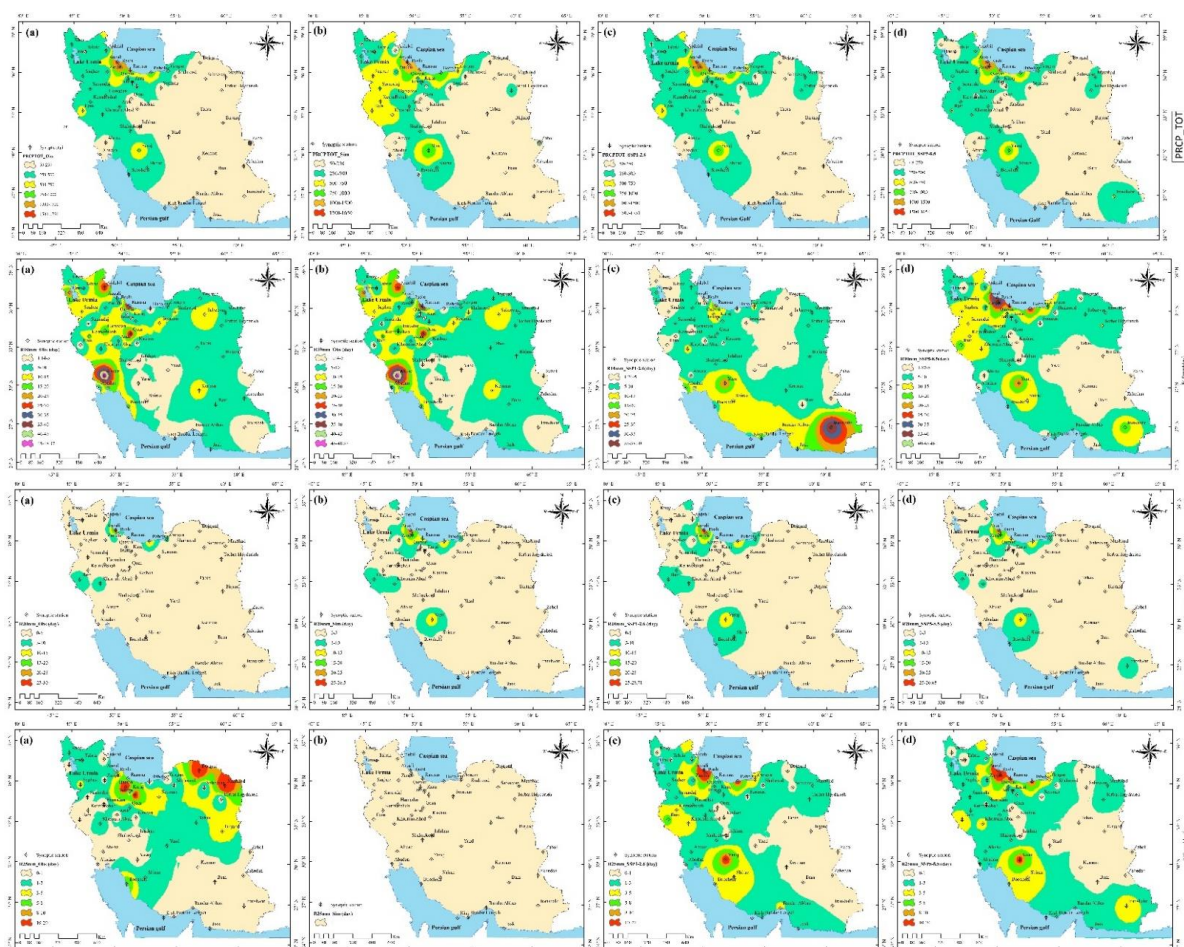
میانگین شاخص R10mm در دوره مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده با سناریوهای تغییر اقلیم محاسبه شد و سپس برای کل ایران پهنه‌بندی شد (شکل ۴). این شاخص نماد شاخص بارش سنگین بوده و افزایش آن بیان‌گر افزایش میزان بارش‌های سنگین است که می‌تواند موجب بروز سیل در منطقه شود. اندازه این شاخص با هر دو سناریو در ایستگاه‌های بابلسر، بندرعباس، بندرلنگه، گرگان، ایلام، ابرانشهر، کرج، خرم‌آباد، قزوین، سمنان، شیراز، تربت حیدریه، یاسوج، یزد و زنجان افزایش یافت. بنابراین در این ایستگاه‌ها (۳۵٪ از ایستگاه‌های همدید منتخب) با افزایش بارش‌های سنگین مواجه هستند. بر اساس یافته‌های

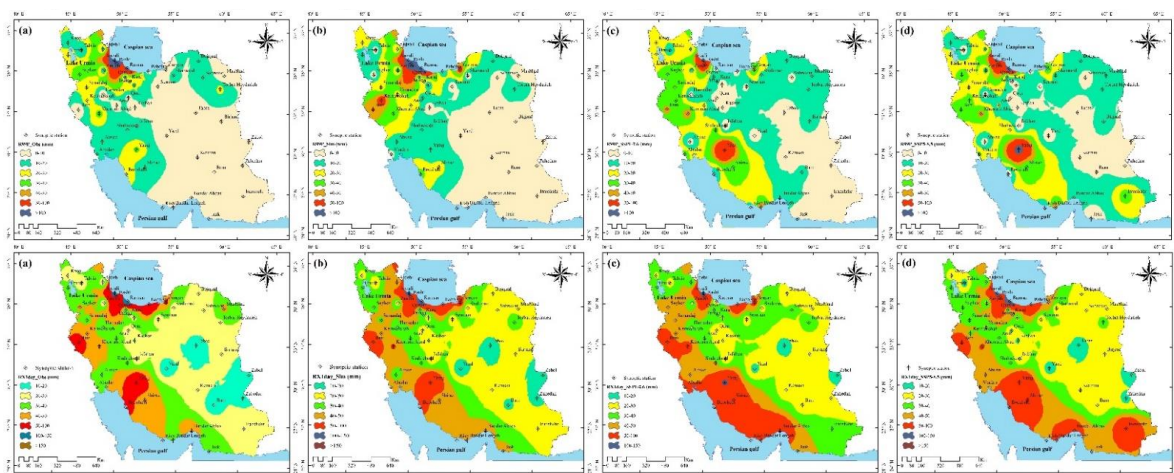
حدی بیشتر از ۲۵ میلی متر با سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 کاهش یافت. بیشترین کاهش شاخص در ایستگاه بوشهر و ۹۵٪ خواهد بود. عمل کرد سناریوهای تغییر اقلیم فقط در ایستگاه رامسر متفاوت بود. همچنین، با سناریوی SSP1-2.6 کاهش ۹۴٪ شاخص R25mm و با سناریوی SSP2-8.5 افزایش ۱۵۷٪ این شاخص پیش بینی شد. در ایستگاه های آبادان، اهواز، بندرانزلی، اراک، اردبیل، بم، بندرعباس، بندرلنگه، گرگان، همدان، ایلام، ایرانشهر، اصفهان، جاسک، کرج، کاشان، کرمان، کرمانشاه، خرم آباد، کیش، رشت، سبزوار، سنندج، شاهرود، طبرستان، تبریز، تهران، یزد، زاهدان و زابل (۶۴٪ ایستگاه های همدید) در دوره ۲۰۳۰-۲۰۵۰ بارش خیلی سنگین (بیشتر از ۲۵ میلی متر) افزایش خواهد یافت. افزایش بارش خیلی سنگین می تواند احتمال رخداد سیلاب های بزرگ را افزایش دهد. از این رو، ۶۴٪ از ایستگاه های همدید منتخب در معرض خطر سیل هستند و در دوره ۲۰۳۰-۲۰۵۰ اندازه شاخص R25mm این شمار از ایستگاه ها افزایش خواهد یافت.

سقز، سنندج، سمنان، شهرکرد، شاهرود، شیراز، طبس، تبریز، تهران، تربت حیدریه، ارومیه، یاسوج، یزد، زاهدان، زنجان و زابل (۷۴٪ ایستگاه های همدید) در دوره ۲۰۳۰-۲۰۵۰ بارش خیلی سنگین (بیشتر از ۲۰ میلی متر) افزایش خواهد یافت. افزایش بارش سنگین می تواند احتمال رخداد سیلاب را افزایش دهد. در نتیجه ۷۴٪ از ایستگاه های همدید منتخب با خطر سیل مواجه هستند. از سوی دیگر، جازای زاده و همکاران (۲۰۲۳) نیز افزایش اندازه شاخص در ایستگاه های سقز و سنندج با سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 را گزارش کردند.

مقایسه شاخص R25mm در دوره پایه و آینده

پراکنش مکانی مجموع بارش خیلی سنگین (بیشتر از ۲۵ میلی متر) مشاهده شده و شبیه سازی شده در دوره پایه و با سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج این پژوهش در ایستگاه های بیرجند، بوشهر، بجنورد، خوی، مشهد، قزوین، قم، سقز، سمنان، شاهرود، طبس، تبریز، تهران، یزد، زابل و زاهدان تعداد رخداد های





شکل ۴- پراکنش مکانی شاخص‌های حدی بارش مشاهده شده (a) شبیه‌سازی شده (b)، با سناریوی SSP1-2.6 (c) و با سناریوی SSP5-8.5 (d).
Figure 4- Spatial distribution of precipitation Extremes Indices observed (a), simulated (b), under SSP1-2.6 scenario (c) and under SSP5-8.5 scenario (d).

اراک، اردبیل، بزم، بندرعباس، بندرلنگه، بیرجند، بجنورد، ایلام، ایرانشهر، گرگان، همدان، کاشان، خرم‌آباد، خوی، کیش، کرمانشاه، مشهد، سمنان، شاهرود، شیراز، یاسوج، یزد و زنجان افزایش یافت. براساس نتایج این پژوهش، اندازه این شاخص در ایستگاه‌های اهواز، بندرانزلی، بوشهر، اصفهان، جاسک، کرج، کرمان، قزوین، قم، رشت، سبزوار، سقز، طیس، تهران، تربت حیدریه، ارومیه، زابل و زاهدان شاخص R99P با سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 کاهش یافت (شکل ۴). بیشترین کاهش اندازه شاخص R99P در ایستگاه رامسر و ۹۷٪ بود. در ایستگاه‌های آبادان، اراک، اردبیل، بزم، بندرعباس، بندرلنگه، بیرجند، بجنورد، گرگان، همدان، ایلام، ایرانشهر، کاشان، کرمانشاه، خرم‌آباد، خوی، کیش، مشهد، سمنان، شاهرود، شیراز، یاسوج، یزد و زنجان شاخص R99P با سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 افزایش یافت. عمل کرد سناریوهای نامبرده در ایستگاه‌های بابلسر، رامسر و تبریز متفاوت بود.

نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم، از مسائل مهم و چالش‌برانگیز پیش روی جامعه‌های بشری در قرن بیست و یکم است. با پیشرفت صنعت و افزایش فعالیت‌های انسانی، آثار تغییر اقلیم در سراسر جهان قابل مشاهده است. پژوهش‌های پر شمار نشان می‌دهند که تغییرات اقلیم در سراسر جهان منجر به تغییرات شاخص‌های حدی بارش می‌شود. این تغییرات شامل کاهش دامنه بارش و تغییر الگوی بارش هستند. با تغییر الگوی بارش، اندازه بارش‌های سنگین افزایش یافته و موجب رخداد سیلاب و خسارت‌های جدی و تغییرات در تعادل آب و هوا می‌شود. در گزارش پنجم IPCC در دوره ۲۰۱۰-۱۹۹۰ گزارش شده است که افزایش گرمایش جهانی موجب تغییر نمایه‌های حدی بارش، دما و افزایش شدت و فراوانی رخدادهای حدی مانند سیل و خشک‌سالی

مقایسه شاخص RX-1day در دوره پایه و آینده

شاخص RX1-day نشان‌دهنده بیشترین بارش ۲۴ ساعته است. هر چه این شاخص بیشتر باشد، شدت بارش نیز بیشتر خواهد بود. در این پژوهش، اندازه این شاخص در ایستگاه‌های آبادان، اهواز، اردبیل، بزم، بندرعباس، بندرلنگه، بیرجند، بوشهر، ایلام، ایرانشهر، جاسک، کرج، خرم‌آباد، خوی، کیش، قزوین، سبزوار، سمنان، شاهرود، شیراز، طیس، تربت حیدریه، یاسوج، یزد و زابل با سناریوهای SSP1-2.5 و SSP5-8.5 افزایش یافت. از این رو، می‌توان گفت شدت بارش در این ایستگاه‌ها در دوره آتی (۲۰۵۰-۲۰۳۰) در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۲۲) بیشتر خواهد بود. با افزایش شدت بارش، جذب و نگهداری آب در خاک کاهش یافته و جریان سطحی آب افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج این پژوهش، بیشترین بارش ۲۴ ساعته در دوره آینده و با سناریوی SSP5-8.5 در ایستگاه‌های بندرانزلی، اراک، بابلسر، بجنورد، گرگان، همدان، اصفهان، کاشان، کرمانشاه، مشهد، قم، رشت، سقز، سمنان، تبریز، تهران، ارومیه و زاهدان (۴۰٪ ایستگاه‌های همدید) کاهش خواهد یافت. بیشترین کاهش اندازه شاخص نامبرده با این سناریو در ایستگاه مشهد ۳۷٪ بود. در حالی که اندازه شاخص RX1-day ایستگاه‌های همدید بابلسر، همدان، اصفهان، کرمانشاه، مشهد و رامسر با سناریوی SSP1-2.5 کاهش یافت (شکل ۴). این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های سلطانی و همکاران (۲۰۱۶)، کتیرایی-بروجردی و همکاران (۲۰۱۹) و فتحیان و همکاران (۲۰۲۰) هم‌راستا است.

مقایسه شاخص R99P در دوره پایه و آینده

شاخص R99P، روزهای فوق‌العاده مرطوب را نشان می‌دهد. افزایش این شاخص بیان‌گر افزایش بارش‌های شدید و فوق‌العاده در مقایسه با میانگین بلندمدت در دوران پایه است. این شاخص با هر دو سناریوی اقلیمی در دوره آتی در ایستگاه‌های آبادان،

کوزه‌گران (۲۰۱۷)، علوی‌نیا و زارعی (۲۰۲۲)، کاظمی‌راد و مدبری (۲۰۲۳)، حجازی زاده و همکاران (۲۰۲۳)، رحیم‌زاده و همکاران (۲۰۰۹)، علوی‌نیا و همکاران (۲۰۲۰) و فتحیان و همکاران (۲۰۲۰) هم‌راستا است.

در پایان می‌توان گفت پیش‌بینی روند افزایشی شاخص‌های بارش شدید، به‌ویژه شاخص‌های شدت و فراوانی رویدادهای حدی بارش نشان‌دهنده خطر بالقوه رخداد سیلاب‌های مکرر در مناطق گوناگون ایران است که تهدید جدی برای منابع آب، امنیت غذایی، سلامت انسان و فعالیت‌های زیست محیطی است. بنابراین، بررسی دقیق رویدادهای حدی بارش و تأثیرات آنها بر برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری آینده در بخش‌های گوناگون ضروری است. از این‌رو، انجام این گونه پژوهش‌ها در آبریزهای اصلی کشور در مقیاس کوچکتر و با تعداد ایستگاه‌های بیشتر و دیگر آزمون‌های تشخیص روند و مقایسه آن با نتایج آزمون آماری من-کندال پیشنهاد می‌شود. همچنین، پژوهش‌ها در دوره‌های آماری هماهنگ با فصل‌های رشد هر منطقه نیز انجام شود و از نتایج آن برای آگاهی و راهنمایی برنامه‌ریزان و کشاورزان برای کاهش خطر تولید محصولات کشاورزی در منطقه استفاده شود. در این پژوهش از سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 که خوش‌بینانه‌ترین و بدبینانه‌ترین حالت از وضعیت تغییر اقلیم را پیشنهاد می‌دهند، استفاده شد. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی، دیگر سناریوهای تغییر اقلیم نیز بررسی شود تا بودن قطعیت مربوط به این سناریوها نیز مشخص شود.

شده است و بر زندگی انسان و موجودات زنده تأثیرگذار بوده است. بنابراین، امروزه ارزیابی سنجه‌های حدی بیشتر از بررسی میانگین متغیرهای اقلیمی ضرورت دارد. این پژوهش با هدف بررسی تغییرات شاخص‌های حدی بارش با سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 در ایران و برای دوره ۲۰۲۲-۱۹۸۵ انجام شد. نتایج بارش شبیه‌سازی‌شده ایستگاه‌های همدید کشور برای دوره مشاهده‌ای (۲۰۲۲-۱۹۸۵) و دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۵۰) با سناریوهای اقلیمی نشان داد که تغییرات بارش سالانه در ایستگاه‌های همدید کشور یکنواخت نیست و در برخی ایستگاه‌ها بارش سالانه در مقایسه با دوره پایه (۲۰۲۲-۱۹۸۵) کاهش و در برخی دیگر افزایش خواهد داشت. همچنین به‌منظور بررسی روند نمایه‌های حدی بارش، ۷ شاخص حدی بارش بررسی شدند. نتایج این بررسی نشان داد که در دوره ۲۰۲۲-۱۹۸۵ در سطح کشور ایران روند مجموع بارش سالانه کاهشی و منفی بود و در ۳۰٪ ایستگاه‌های همدید بررسی‌شده این روند معنادار بود. نتایج این پژوهش نشان داد که اندازه بارش در ایستگاه‌های پربارش و با بارش میانگین، به‌ویژه در بخش‌های شمالی کشور کاهش یافت. همچنین، پیش‌بینی شد که در دوره آینده اندازه شاخص‌های شدت بارش (RX-1day و R99P) در بیشتر ایستگاه‌های همدید بررسی‌شده افزایش خواهد یافت. توزیع مکانی تغییرات در شاخص‌های حدی بارش نیز نشان‌دهنده تغییرات بیشتر شمال و غرب کشور در مقایسه با مناطق جنوبی و مرکزی بود. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های رحیم‌زاده (۲۰۰۶)، محمدی و همکاران (۲۰۱۷)، عسکری زاده و همکاران (۲۰۱۸)،

فهرست منابع

- Abbas A, Bhatti AS, Ullah S, Ullah W, Waseem M, Zhao C, Ali G. 2023. Projection of precipitation extremes over South Asia from CMIP6 GCMs. *Journal of Arid Land*, 15(3): 274-296. <https://doi.org/10.1007/s40333-023-0050-3>
- Alaei Taleghani M. 2003. *Geomorphology of Iran*. Ghoomes Publications. 416 p.
- Alavinia SH, Zarei M. 2021. Analysis of spatial changes of extreme precipitation and temperature in Iran over a 50-year period. *International Journal of Climatology*, 41(s1): 2269-2289. <https://doi.org/10.1002/joc.6845>
- Alavinia SH, Zarei M. 2022. Climate change trends analysis using extreme indices of long-term precipitation and temperature in Southeast Iran. *Regional Planning*, 11(44): 119-134. (In Persian). <https://doi.org/10.30495/jzpm.2022.4059>
- Askarizadeh SM, Mozaffari G, Kohi M, Rezahipoor A. 2018. Variations in precipitation and temperature extreme values in Torbat-e-Hidariyh using the LARS-WG downscaling model during 2011-2030. *Geographic Thought*, 10(19): 60-80.
- Bazrafshan Moghaddam M. 2016. Evaluation of climate change's effect on precipitation and temperature in different parts of Iran. M.Sc. Thesis, Civil Engineering. Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, 122 p. (In Persian).
- Binesh N, Niksokhan MH, Sarang A. 2016. Precipitation trend analysis and determination of dry/wet years in Kan Watershed during recent years. *Extension and Development of Watershed Management*, 4(14): 9-16. (In Persian).
- Chen L, Ford TW. 2023. Future changes in the transitions of monthly-to-seasonal precipitation extremes over the Midwest in Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 models. *International Journal of Climatology*, 43(1): 255-274. <https://doi.org/10.1002/joc.7756>
- Costa AA, Guimarães SO, Sales DC, das Chagas Vasconcelos Junior F, Marinho MWS, Pereira JMR, da Silva EM. 2023. Precipitation extremes over the tropical Americas under RCP4.5 and RCP8.5 climate change scenarios: Results from dynamical downscaling simulations. *International Journal of Climatology*, 43(2): 787-803. <https://doi.org/10.1002/joc.7828>
- Doolabian Sh. 2017. Evaluating the effects of climate change on precipitation and temperature over different parts of Iran using RCP scenarios. M.Sc. Thesis, Civil Engineering, Shahrood University of Technology, 115 p. (In Persian).
- Esgandari R, Esmali Ouri A, Mostafazadeh R, Choobeh S. 2024. Assessment of temporal and spatial variations of precipitation climate extreme indices in the central part of Ardabil Province. *Journal of Environmental Science Studies*, 9(1): 8119-8133. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/jess.2023.382713.1963>
- Ezaz GT, Zhang K, Li X, Shalehy MH, Hosain MA, Liu L. 2022. Spatiotemporal changes of precipitation extremes in Bangladesh during 1987-2017 and their connections with climate changes, climate oscillations, and monsoon dynamics.-*Global and Planetary Change*. 208, 103712. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103712>
- Farrokhzadeh B, Choobeh S, Nouri H, Goodarzi M. 2018. Study of climate change and land use changes impacts on surface runoff: Balighlo Chai Watershed in Ardebil. *Watershed Engineering and Management*, 10(3): 318-331. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.107110.1165>

- Fathian F, Ghadami M, Haghighi P, Amini M, Naderi S, Ghaedi Z. 2020. Assessment of changes in climate extremes of temperature and precipitation over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 141:1119-1133. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03269-2>
- Ge F, Zhu S, Luo H, Zhi X, Wang H. 2021. Future changes in precipitation extremes over Southeast Asia: insights from CMIP6 multi-model ensemble. *Environmental Research Letters* 16(2): 024013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd7ad>.
- Khorshidoost AM, Ghavidel Rahimi Y. 2004. Study of precipitation fluctuations, forecasting, and determination of wet and dry winter seasons in East Azerbaijan Province. *Geographical Research Journal*, 19(1): 25-36. (In Persian).
- Goodarzi M, Choobeh S. 2019. Assessment of downscaling methods in predicting climatic parameters under climate change status: A case study in Ardabil Synoptic Station. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 13(45): 63-69
- Goyal MK, Gupta AK, Jha S, Rakasagi S, Jain V. 2022. Climate change impact on precipitation extremes over Indian cities: Non-stationary analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121685>
- Gupta S, Gupta A, Himanshu SK, Singh R. 2019. Analysis of the extreme precipitation events over upper catchment of Sabarmati River Basin in Western India using extreme precipitation indices. In *Advances in Water Resources Engineering and Management: Select Proceedings of TRACE*. Singapore: Springer Singapore, pp.103-111. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8181-2_8
- Harrison PA, Dunford RW, Holman IP, Cojocaru G, Madsen MS, Chen, PY, Sanders D. 2019. Differences between low-end and high-end climate change impacts in Europe across multiple sectors. *Regional Environmental Change*, (19):695-
- Hejazizadeh Z, Zarei S. 2023. Investigation of changes in temperature and precipitation indicators in Kurdistan Province based on radiation injection scenarios (RCP). *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 23(69): 1-14. (In Persian). <https://doi.org/10.61186/jgs.23.69.1>
- Hong YIN, Ying SUN. 2019. Characteristics of extreme temperature and precipitation in China in 2017 based on ETCC-DI indices. *Advances in Climate Change Research*, 15(4): 363 -373. <https://doi.org/10.12006/j.issn.1673-1719.2018.164>
- Jafarzadeh A, Khashei-Siuki A, Shahidi A. 2016. Assessment of statistical downscaling methods LARS-WG & SDSM in forecasting climate parameter variation. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(4): 309-322. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jwfs.2016.10385.2482>
- Jahanbakhsh Asl S, Mohammad Khorshidoost A, Din Pazhooh Y, Sarafroozeh F. 2015. Trend analysis and estimating return periods of extreme temperature and precipitation in Tabriz. *Geography and Planning*, 18(50): 107-133. (In Persian).
- Jowkar L, Panahi F, Sadatinejad SJ, Shaki-ba A. 2021. Precipitation extremes variability trend in Bakhtegan Catchment using agMERRA and station data. *Irrigation and Water Engineering*, 12(1): 364-381. (In Persian). <https://doi.org/10.22125/iwe.2021.138351>
- Kamal A, Massah Bavani A. 2010. Climate change and variability impact on basin runoff with interference of two hydrology models uncertainty. *Water and Soil*, 24(5): 39-50. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.5283>
- Katiraie-Boroujerdy PS, Akbari Asanjan A, Chavoshian A, Hsu KL, Sorooshian

- S. 2019. Assessment of seven CMIP5 model precipitation extremes over Iran based on a satellite-based climate data set. *International Journal of Climatology*, 39(8): 3505-3522. <https://doi.org/10.1002/joc.6035>
- Khazaei MR, Khazaei H, Saghaian B. 2020. Climate change impact on extreme precipitations in arid region of Iran. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(9): 31-42. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/jest.2021.40667.4508>
- Kazemi Rad L, Modaberi H. 2023. Evaluation of climatic parameters in even lake affected by climate change. *Journal of Environmental Science Studies*, 8(3): 6936-6942. <https://doi.org/10.22034/jess.2022.332757.1890>
- Khoi DN, Trong Quan N, Thi Thao Nhi P, Nguyen VT. 2021. Impact of climate change on precipitation extremes over Ho Chi Minh City, Vietnam. *Water*, 13(2): 120-147. <https://doi.org/10.3390/w13020120>
- Kouzegaran S. 2017. Evaluating the effects of climate change on precipitation and temperature over different parts of Iran using RCP scenarios. Ph.D. Thesis. Agrometeorology. Faculty of Agriculture. Ferdowsi University of Mashhad. 182 p. (In Persian).
- Kouzegaran S, Mousavi Baygi M. 2015. Investigation of meteorological extreme events in the North-East of Iran. *Water and Soil*, 29(3): 750-764. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.40845>
- Lotfi rad M, Ahmadian S, Adib A. 2020. The effect of climate change on the trend of seasonal precipitation in Iran. *National Conference on Building, Environment and Energy Management*. Ahvaz. August 5. 9 p. (In Persian).
- Mohammadi H, Azizi G, Khoshahklagh F, Ranjbar F. 2017. Analysis of daily precipitation extreme indices trend in Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 49(1): 21-37. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jphgr.2017.61577>
- Mohammadlo M, Haghizadeh A, Zeinivand H, Tahmasebi Pour N. 2017. Evaluation of climate change on temperature and precipitation trends in Barandozchay watershed, in the West Azerbaijan, using general circulation models (GCM). *Journal of Geographic Space*, 16(56):151-168.
- Moriasi DN, Gitau MW, Pai N, Daggupati P. 2015. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6): 1763-1785.
- Neelin JD, Martinez-Villalobos C, Stechmann SF, Chen G, Norris JM, Lenderink G. 2022. Precipitation extremes and water vapor: Relationships in current climate and implications for climate change. *Current Climate Change Reports*, 8(1): 17-33. <https://doi.org/10.1007/s40641-021-00177-z>
- Panda DK, Mishra A, Jena SK, James BK, Kumar A. 2007. The influence of drought and anthropogenic effects on groundwater levels in Orissa, India. *Journal of Hydrology*, 343(3-4): 140-153. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.007>
- Peñuelas J, Ciais P, Canadell JG, Janssens IA, Fernández-Martínez M, Carnicer J, Sardans J. 2017. Shifting from a fertilization-dominated to a warming-dominated period. *Nature Ecology and Evolution*, 1(10): 1438-1445. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0274-8>
- Purnomo H. 2018. Aplikasi metode interpolasi inverse distance weighting dalam penaksiran sumberdaya laterit nikel. *Journal Ilmiah Bidang Teknologi ANGKASA*, 10(1): 49-60.
- Rahimzadeh F. 2006. Investigating the changes in precipitation extremes indices in Iran. *Nivar*, 30(58-59): 7-20. (In Persian).
- Rahimzadeh F, Asgari A, Fattahi E. 2009. Variability of extreme temperature and

- precipitation in Iran during recent decades. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(3): 329-343.
- Shukla PR, Skea J, Calvo Buendia E, Masson-Delmotte V, Pörtner HO, Roberts DC, Malley J. 2019. IPCC, 2019: Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. 874 p.
- Soltani M, Laux P, Kunstmann H, Stan K, Sohrabi MM, Molanejad M, Martin MV. 2016. Assessment of climate variations in temperature and precipitation extreme events over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, pp. 775-795. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1609-5>
- Tavangar S, Moradi H, Massah Bavani AR. 2019. Climate change effect on the precipitation amount and intensity in the southern coast of the Caspian Sea. *Irrigation and Water Engineering*, 10(2):190-204. (In Persian). <https://doi.org/10.22125/iwe.2019.100751>
- Van der Wiel K, Bintanja R. 2021. Contribution of climatic changes in mean and variability to monthly temperature and precipitation extremes. *Communications Earth and Environment*, 2(1):1-11. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00077-4>
- Zhao W, Zhong Y, Li Q, Li M, Liu J, Tang L. 2022. Comparison and correction of IDW based wind speed interpolation methods in urbanized Shenzhen. *Frontiers of Earth Science*, 16(3): 798-808. <https://doi.org/10.1007/s11707-021-0948-z>
- Zhang X, Aguilar E, Sensoy S, Melkonyan H, Tagiyeva U, Ahmed N, Wallis T. 2005. Trends in Middle East climate extreme indices from 1950 to 2003. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D22): 1-12. <https://doi.org/10.1029/2005JD006181>
- Zhang M, Chen Y, Shen Y, Li B. 2019. Tracking climate change in central Asia through temperature and precipitation extremes. *Journal of Geographical Sciences*, pp. 3-28. <https://doi.org/10.1007/s11442-019-1581-6>
- Zand M, Miri M, Kousari M. 2023. Detection of climate change in Lorestan Province using climate extreme indices. *Watershed Engineering and Management*, 15(1): 27-41. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.354926.1905>
- Zarrin A, Dadashi-Roudbari A. 2022. Technical note: assessing the effect of climate change on heavy precipitation in Iran Based on a CMIP6 Ensemble model. *Journal of Water and Sustainable Development*, 8(4):119-124. (In Persian). <https://doi.org/10.1001.1.24235474.1400.8.4.14.9>



Fars Agricultural and Natural Resources
Research and Education Center



Agricultural Research, Education
and Extension Organization

Impact of Climate Change on Precipitation Extremes Indices over Iran

Sepideh Choobeh¹, Behnoush Farrokhzadeh², Ommolbanin Bazrafshan³, Haniyeh Hasanvand⁴

1- Ph.D. Graduated in Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

2- Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Malayer University, Malayer, Iran

3- Professor, Department of Natural resources Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

4- M.Sc. Graduated in Watershed Management, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Climate change leads to changes in extreme climate indices, such as an increased intensity and frequency of extreme weather events. Heavy precipitation during these events can cause widespread damage to the economy, the environment and human life. According to the World Economic Forum's (WEF) Global Risks Report 2019, extreme climate events (such as heavy precipitation) and climate inadaptability are the greatest risks in terms of their impact on the environment and people. The purpose of this study was to examine the impact of climate change on heavy precipitations in the Iran.

Materials and Methods

Precipitation data from 47 stations was utilized in this study. First, the performance of the model was evaluated. LARS-WG software was employed to predict precipitation data with various scenarios for the future period. To evaluate the simulation of extreme precipitation using the aforementioned model, in addition to graphically comparing the observed and generated data of each station in the validation process, the RB, MD, and WS indices were calculated between the observed and simulated extreme index data. Finally, the Mann-Kendall test was utilized to examine the pattern of heavy precipitation events.

Article Type: Research Article

*Corresponding Author E-mail: h.behrawan@areeo.ac.ir

Citation: Behrawan, H., Yarahmadi, J., Abbasi, H.R. 2024. Identification and Monitoring of Sources of Dust and Dunes in the Jolfa, ShushQom and Gildar in the East Azarbaijan Province. Watershed Management Research. 37(3): 34-53.

DOI: 10.22092/WMRJ.2023.363055.1565

Received: 01 August 2023, **Received in revised form:** 04 October 2023, **Accepted:** 21 December 2023

Published online: 22 September 2024

Watershed Management Research, VOL. 37, No.3, Ser. No: 144, Autumn 2024, pp. 34-53.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center

©Author(s)



Results and Discussion

The simulation results for precipitation in the period 2030-2050 show that the synoptic stations will experience uneven annual fluctuations. The largest increase in annual precipitation was 59.81% (32.32 mm) at the Bam station and SSP5-8.5 scenario, and the largest decrease in annual precipitation was 11.63% (17.23 mm) at the Kish station and SSP5-8.5 scenario. According to the spatial distribution of PRCPTOT, the Yasouj station experienced the highest increase in annual precipitation under the SSP1-2.6 scenario. At this station, the annual precipitation for the future period was estimated to be 933.49 and 889.3 mm with the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios respectively. Also, the magnitude of this indicator during the base period at this station was predicted to be 832.19 mm.

Furthermore, it was predicted that this indicator will be 832.19 mm during the base period at this station. The results of the study of changes in precipitation extreme indices in the period 2030-2050 compared to 1985-2022 showed that the greatest changes were in the northern and western regions of the Iran, and the severity of these changes was especially greater with the SSP5-8.5 scenario. The largest decrease in the Rx1day index was related to the Mashhad station with the SSP5-5.5 scenario, which was 37%. The highest increasing trend was related to the Zanzan station in the RCP8.5 scenario.

Conclusion and Suggestions

Numerous studies around the world have shown that climate change leads to changes in extreme precipitation. A decrease in precipitation intensity and a change in precipitation patterns are among these changes. According to the results of this study, the trend of extreme indices was not uniform, and it was increasing in some synoptic stations and decreasing in others. In general, precipitation intensity is expected to increase in the future and with climate scenarios in most of the studied stations. The impact of extreme precipitation events on future planning and policymaking in various sectors should be carefully examined. Therefore, it is suggested that similar studies be conducted in the country's main watersheds on a smaller scale and in a larger number of stations with other trend detection tests, and the results be compared with the Mann-Kendall statistical test.

Keywords: Atmospheric General Circulation Models, Climate Scenarios, CMIP6, Downscaling, Heavy Precipitation, Iran



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

تحلیلی بر گرانیگاه بارش در شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی استان اردبیل

زینب حزب‌بوی^{۱*}، وحیده مرادزاده^۲، مهین حنیفه‌پور^۳، نازیلا علائی^۴

- ۱ - دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
- ۲ - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
- ۳ - دکترای بیابان‌زدایی، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، کرج، ایران
- ۴ - دانشجوی دکتری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

روند کاهشی اندازه بارش در بسیاری از مناطق کشور از جمله استان‌های شمال غرب کشور سبب شده است تا بررسی روش‌های جدید به منظور تکمیل پایگاه‌های داده‌ای آبخیزهای کشور بیش از پیش ضروری شود. در این راستا، درک تغییرات گرانیگاه بارش به عنوان یک مفهوم نوظهور که نشان‌دهنده توزیع مکانی بلندمدت بارش منطقه‌ای است، برای مدیریت چالش‌های آبخیزداری از جمله کاهش اثرات خشک‌سالی، مهار سیلاب و حفاظت از منابع آب اهمیت دارد. به این منظور، این پژوهش با هدف تحلیل گرانیگاه بارش و ارتباط آن با توزیع مکانی شبکه باران‌سنجی در استان اردبیل انجام شد.

مواد و روش‌ها

برای محاسبه گرانیگاه بارش، از آمار بارش ۴۹ ایستگاه هواشناسی در دوره آماری ۴۵ ساله (۱۳۹۵-۱۳۵۰) استفاده شد. بر اساس اصل استخراج ایستگاه و با در نظر گرفتن منطقی بودن کمترین تراکم و یکنواختی، پنج ایستگاه به عنوان کمترین تعداد ممکن تعیین شد. سپس، تراکم ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ایستگاه به شکل تصادفی استخراج شد تا توزیع گرانیگاه بارندگی با تراکم شبکه ایستگاه‌ها مقایسه شود. برای پیاده‌سازی مدل مرکز ثقل، محاسبه بیضی انحراف

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: z.hazbavi@uma.ac.ir

استناد: حزب‌بوی، ز.، مرادزاده، و.، حنیفه‌پور، م.، علائی، ن. ۱۴۰۳. تحلیلی بر گرانیگاه بارش در شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی استان اردبیل. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۷ (۴): ۷۰-۵۴.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2024.364724.1570

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۰۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۳، دوره ۳۷، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۴۵، زمستان ۱۴۰۳، صفحه‌های ۵۴ تا ۷۰.

© نویسندگان

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



استاندارد در محیط نرم‌افزار ArcMap10.8 انجام شد و برای تحلیل همبستگی متعارف (CCA) از XLSTAT در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که در بهار (فروردین تا خرداد)، جهت حرکت گرانیگاه بارش به‌طور قابل‌توجهی متفاوت بود و فاصله حرکت ۱۸/۱۷ کیلومتر برآورد شد. در تابستان (تیر تا شهریور)، حرکت گرانیگاه بارش عمدتاً ۲۰/۱۸ کیلومتر به سمت شمال بود. در پاییز (مهر تا آذر)، حرکت گرانیگاه بارش عمدتاً ۲۰/۴۸ کیلومتر به سمت جنوب بود و بیشترین فاصله حرکت در مقایسه با دیگر فصل‌ها، در فصل پاییز بود. در زمستان (دی تا اسفند)، جهت حرکت گرانیگاه بارش در جهت‌های متفاوتی بود و کمترین فاصله حرکت (۸/۳۵ کیلومتر) در مقایسه با دیگر فصل‌ها در فصل زمستان بود. جهت حرکت گرانیگاه بارش سالانه نیز عمدتاً به سمت جنوب-شرقی بود.

بیشترین فاصله حرکت گرانیگاه ۱۱۱/۷۸ کیلومتر به سمت شمال غربی در سال ۱۳۵۸ بود. همچنین، گرانیگاه بارش سالانه در استان اردبیل در سه دهه ۱۳۵۰ تا ۱۳۶۰ عمدتاً به سمت شمال غربی و در دیگر دهه‌ها به سمت جنوب شرقی حرکت کرد. همبستگی میان تراکم شبکه ایستگاه‌ها با تغییرات گرانیگاه بارش، مثبت ($CCA=0/65$) در سطح معنی‌داری ۵٪ بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

از میان تراکم‌های گوناگون ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰، بیشترین ضریب همبستگی متعارف با اندازه ۰/۸۰ برای تراکم ۴۰ ایستگاه به دست آمد و کمترین اندازه این ضریب برای کمترین تراکم ۵ ایستگاه با اندازه ۰/۰۴ بود. بر اساس نتایج این پژوهش، تغییرات حرکت الگوهای بارش که در دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی می‌تواند مؤثر باشد، مشخص شد. پیشنهاد می‌شود که ارتباط میان تغییر اقلیم و عامل‌های پستی‌بلندی با تغییرات مکانی-زمانی گرانیگاه بارش بررسی شود.

واژگان کلیدی: آبخیزهای کوهستانی، الگوی مکانی، تراکم ایستگاه‌ها، جهت حرکت بارش، خوشه‌بندی

مقدمه

و رونق جامعه ضروری است (سان و لوتز ۲۰۲۰؛ ژانگ و همکاران ۲۰۲۰؛ نظری پویا ۲۰۲۲). تحلیل شبکه می‌تواند به‌طور مؤثر و کارآمد برای تجزیه و تحلیل تبادل منابع و روابط میان ایستگاه‌های گوناگون بارش استفاده شود. افزون بر این، تحلیل شبکه بارش در برنامه‌ریزی شبکه حمل و نقل منطقه‌ای، امکانات ارتباطی و چیدمان مکانی جمعیت، صنعت و بوم‌شناسی نقش دارد (ژائو و همکاران ۲۰۱۸). در این راستا، مرکز ثقل شبکه به‌عنوان یک مفهوم فیزیکی، از مکانیک کلاسیک مشتق شده و بیان‌گر نقطه‌ای است که در آن هر بخش از یک جسم تحت تأثیر گرانش است. در بعد مکانی، مرکز ثقل منطقه‌ای^۱ درجه توافقی میان شاخص‌های توسعه منطقه‌ای و تحلیل مرکز را منعکس می‌کند که برای تحلیل سیالیت و تجمع عناصر منطقه‌ای در مکان مناسب است. در بعد زمانی، تغییر پویای مرکز ثقل منطقه‌ای نشان‌دهنده تضاد و انتقال توزیع عناصر منطقه‌ای است که به تعمیق مسیر، وضعیت و روند توسعه منطقه‌ای کمک می‌کند (بارمپاس و همکاران ۲۰۱۷، چن و همکاران ۲۰۱۷).

وجود پایگاه‌های اطلاعات دقیق بارش در مقیاس آبخیز برای برنامه‌ریزان، مدیران و سیاست‌گذاران سرزمین به‌منظور پایش مؤثر رخدادهای حدی از جمله سیل و خشک‌سالی ضروری است. از سوی دیگر، انجام پژوهش‌های آبخیزداری مرتبط مانند پیش‌بینی مؤلفه‌های آب‌شناسی، ارزیابی تغییرات اقلیمی، آمادگی و سازگاری در برابر بلاها و ارزیابی سلامت آبخیز اهمیت زیادی دارند (بلیانی و سلیقه ۲۰۱۷؛ ژو و همکاران ۲۰۲۱؛ بریج و همکاران ۲۰۲۴). بارش، یکی از متغیرهای مهم در چرخه آب و انرژی در کره زمین است (تیواری و همکاران ۲۰۲۲؛ تانگ و همکاران ۲۰۲۳) و نقش حیاتی در تولیدات کشاورزی و تأمین منابع آب خانگی دارد (جالوتا و همکاران ۲۰۰۶). همچنین، این متغیر یکی از داده‌های مهم ورودی به سامانه آب‌شناختی است و به‌عنوان شاخصی برای تشخیص اندازه تغییرات اقلیمی در یک منطقه یا کشور استفاده می‌شود (کاناروزو و همکاران ۲۰۰۶؛ سان و لوتز ۲۰۲۰). بر این اساس، آگاهی از رفتار زمانی-مکانی بارش در برنامه‌ریزی‌های محیطی و آبخیزداری، حفاظت از بوم‌سازگان‌ها، حفظ کشاورزی

۲۰۲۰، از روش بررسی الگوهای حرکت گرانیگاه بارش و تجزیه و تحلیل کمی اثرات گرمای ENSO (ال‌نینو-نوسانات جنوبی) استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که روند بارش در ۶۱ سال گذشته به‌شکل ناچیزی کاهشی بود. با این حال، تفاوت‌های قابل‌توجهی در طرح‌های توزیع مکانی بارش میان مراحل گوناگون رشد وجود دارد. آدو و همکاران (۲۰۲۱) توزیع مکانی و روند زمانی بارش نیجریه از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۳ را تجزیه و تحلیل کردند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که بارش و شدت آن از نظر مکانی در سراسر نیجریه گوناگون بود. همچنین، روند CWD (روزهای مرطوب متوالی) به‌شکل قابل‌توجهی نزولی بود در حالی که در تمام مناطق، روند CDD (روزهای خشک متوالی) به‌شکل قابل‌توجهی صعودی بود. این تغییرات مکانی و زمانی نشان داد که آب و هوای نیجریه به سمت شرایط گرم‌تر و خشک‌تر در حال تغییر است که می‌توان این موضوع را به تغییرات آب و هوایی ناشی از گرمایش جهانی نسبت داد.

تیواری و همکاران (۲۰۲۲) اهمیت گره در شبکه باران‌سنج و تأثیر تفکیک زمانی و تراکم باران‌سنج را کمی‌سازی کردند. در این پژوهش، از مفهوم شبکه‌های پیچیده ۶۹۲ باران‌سنج در آبخیز رود گانگا برای ارزیابی عملکرد گروه هواشناسی هند (IMD)^۵ استفاده شد. آن‌ها مرکزیت درجه مبتنی بر نظریه شبکه پیچیده (DC)^۶، ضریب خوشه‌بندی (CC)^۷ و اطلاعات متقابل (MI)^۸ را به عنوان سنج‌هایی برای تعیین کمیت تغییرپذیری بارش مرتبط با تمام باران‌سنج‌های شبکه در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که وضوح زمانی به‌شدت بر اهمیت یک گره در شبکه باران‌سنج تأثیرگذار بود. افزون بر این، متیبا و همکاران (۲۰۲۳) الگوی مکانی-زمانی یک رویداد بارش که بیش از ۷۵۰۰ زمین‌لغزش را در مقیاس منطقه‌ای با مساحت ۴۰۰ کیلومترمربع در ژاپن موجب‌شده بود، را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تراکم زمین‌لغزش‌ها با افزایش دوره بازگشت بارش در بازه‌های زمانی گوناگون افزایش یافت. افزون بر این، با افزایش تراکم زمین‌لغزش، تعداد زمین‌لغزش‌های نسبتاً بزرگ (تقریباً با مساحت بیش از ۴۰۰ مترمربع) افزایش یافت.

مدل مرکز ثقل^۲ با اندازه‌گیری جهت حرکت مکانی و فاصله هندسی مرکز ثقل هر پدیده یا متغیر (از جمله بارش و ایستگاه اندازه‌گیری آن)، می‌تواند به‌طور دقیق قانون تکامل مکانی آن را ارائه دهد. تجزیه و تحلیل این مدل می‌تواند به‌طور شهودی مسیر متحرک طرح مکانی را منعکس کند، اما تأثیر آن تنها در شرایط خاصی آشکار است (چای و همکاران ۲۰۲۲). در سال‌های اخیر برخی از پژوهشگران از جمله، لیو و همکاران (۲۰۱۲) مرکز ثقل فرسایندگی باران و چن و همکاران (۲۰۱۷)، ژائو و همکاران (۲۰۱۸) و فلاح قاله‌ری و کدخدا (۲۰۱۷) مرکز ثقل بارش را در مقیاس‌های زمانی و مکانی گوناگون تجزیه و تحلیل کرده‌اند. در این راستا، گرانیگاه بارش^۳ به‌عنوان نقطه‌ای تعریف می‌شود که در آن گشتاور بارش روی یک صفحه مکانی تمایل به رسیدن به تعادل به یک گشتاور معین در منطقه را دارد (سان و همکاران، ۲۰۱۴). گرانیگاه می‌تواند منعکس‌کننده توزیع کلی بارش در منطقه باشد و روند توزیع آن منعکس‌کننده پراکندگی، انتقال و توزیع غالبیت بارش است که به تجزیه و تحلیل تفاوت و تعادل بارش منطقه‌ای کمک می‌کند. توزیع مکانی شبکه ایستگاه‌ها (تراکم و یکنواختی)^۴ مستقیماً بر گرانیگاه بارش تأثیر می‌گذارد (چن و همکاران ۲۰۱۷، ژائو و همکاران ۲۰۱۸، وانگ و همکاران ۲۰۲۰، چای و همکاران ۲۰۲۲).

پژوهش‌هایی که به‌طور مشخص در زمینه تحلیل گرانیگاه بارش و مدل مرکز ثقل انجام‌شده، بسیار محدود است. با این حال، تغییرات مکانی و زمانی بارش که به‌عنوان داده ورودی اصلی در تحلیل گرانیگاه بارش به شکل‌های گوناگون در پژوهش‌های آبخیزداری ارزیابی شده است. در این راستا، رن و همکاران (۲۰۱۵) به‌طور جامع تغییرات الگوی بارش بلندمدت در چین را ارزیابی کردند و تغییرات مکانی قابل‌توجهی را مشاهده کردند. به‌طوری‌که روند بارش در بخش‌های جنوبی شمال‌شرق، شمال و جنوب غربی چین کاهشی بود و در مناطق ساحلی جنوب‌شرقی، پایین‌دست رود یانگ‌تسه و شمال‌غربی چین این روند افزایش قابل‌توجهی داشت. همچنین، وانگ و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از داده‌های روزانه بارش برای تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی و زمانی بارش در طول فصل رشد ذرت تابستانی در دشت چین شمالی از سال ۱۹۶۰ تا

2- Center of gravity model

3- Precipitation barycenter

4 -Density and uniformity

5 - Indian Meteorological Department

6 - Degree Centrality

7 - Clustering Coefficient

8 - Mutual Information

در ایران نیز عساکره و سیفی‌پور (۲۰۱۳) در توصیف مکانی سالانه بارش نتیجه گرفتند که گرانیگاه بارش‌های سالانه در مختصات شمالی و شرقی رخ داد. تغییرات مکانی این مرکز ثقل در مسیر سامانه‌های پرشمار بارش ایران زمین بود. ناپایستگی مکانی مرکز ثقل در راستای محور شمال غرب-جنوب شرق، بیان‌گر جابه‌جایی بیش‌تر این مرکز در امتداد نامبرده بود. تحلیل همبستگی مکانی نیز بیان‌گر رابطه مکانی در شعاع حدود ۱۲ کیلومتری بود. مدل برازش داده‌شده بر داده‌های مکانی نشان‌دهنده بزرگی اثر شیب و جهت‌گیری آن بر اندازه بارش بود. فرهنگی و همکاران (۲۰۱۶) فراوانی و توزیع مرکز ثقل بارش‌های تابستانه در زاگرس جنوبی با ۵۴۰ ایستگاه با طول دوره آماری ۵۱ سال (۱۳۹۰-۱۳۴۰) را تحلیل کردند. نتایج آنها نشان داد که بیشینه فراوانی‌ها از نظر زمانی در مرداد و از نظر مکانی در نیمه جنوب شرقی محدود بود و در شرق فارس و بخش‌هایی از هرمزگان و در نزدیکی قلمرو موسمی‌ها بود. همچنین، مرکز ثقل بارش نیز با بیشترین تعداد در محل رخداد بیشترین فراوانی بارش جای گرفتند که بیانگر نظم بیش‌تر در بارش‌های این بخش از محدوده بود و احتمالاً تحت تأثیر عامل‌های همدید مشترک و منظمی به‌وجود آمده اند. فلاح قاهری و کدخدا (۲۰۱۷) رفتار عمومی بارش دشت مشهد را با استفاده از روش‌های آمار مکانی ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که گرانیگاه بارش‌های سالانه نیم‌قرن اخیر دشت مشهد ۳/۸۳ کیلومتر جابه‌جایی داشته است و توزیع جهت‌دار آن، بزرگی اثر شیب و جهت‌گیری آن بر اندازه بارش را نشان داد. همچنین، فاصله استاندارد بارش دشت مشهد در دهه پنجم (۱۳۹۲-۱۳۸۲) در مقایسه با دهه اول (۱۳۵۲-۱۳۴۲) به اندازه ۱۲۵۴/۵۷ واحد تغییر کرد. زندکریمی و همکاران (۲۰۱۸) توزیع مکانی و بهینه‌سازی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی استان کردستان را با استفاده از پراکنش خطای کریجینگ تحلیل کردند. در این پژوهش، وضعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی استان کردستان و ظرفیت بهینه‌سازی موقعیت آن‌ها با استفاده از روش‌های زمین‌آمار بر مبنای پراکنش خطای کریجینگ و با در نظر گرفتن پستی‌بلندی منطقه بررسی شد. نتایج آنها نشان داد که بلندی‌ها بیشترین سهم را در ایجاد خطای برآورد بارش داشتند و با حذف ایستگاه‌هایی که در موقعیت مناسبی نبودند، می‌توان هزینه نگهداری ایستگاه‌ها را کاهش داد. همچنین، با حذف یا جابه‌جایی هشت ایستگاه از ایستگاه‌های موجود و اضافه کردن ۲۸ ایستگاه جدید به شبکه باران‌سنجی، اندازه‌های میانگین پراکنش خطا ۱۱٪ کاهش یافت که بیشترین کاهش در بخش‌های مرکزی استان با ۲۴/۰۳٪ بود. همچنین، نارنگی‌فرد و همکاران (۲۰۲۰) در واکاوی و آشکارسازی

روزانه بارش در ایستگاه همدید شیراز با رویکرد فراکتالی از داده‌های روزانه بارش در یک دوره ۵۸ ساله (۱۳۹۲-۱۳۳۵) از سازمان هواشناسی استان فارس برای بررسی ساختار حاکم بر بارش استفاده کردند. همچنین، نواقص آماری با استفاده از نسبت اختلاف و واریاسی خطی اصلاح شد. نتایج آنها نشان داد که بارش در ایستگاه‌های همدید شیراز با اعمال ساختارهای جبری فراکتالی از منطق فراکتالی در دوره اول پیروی نکرد. همچنین، بر پایه نتایج دوره دوم، مشابه دوره اول، ساختار بارش با منطق فراکتالی خاصی مطابقت نداشت. به بیان دیگر، سنجه منطق حاکم بر بارش در دوره‌های اول و دوم از حالت تعادلی به حالت غیرتعادلی تغییر یافت. اما برخلاف دو دوره پیشین، منطق فراکتال در دوره سوم ادامه یافت. نظری پویا (۲۰۲۲) نیز اثر ۱۶ نشانک اقلیمی بر بیشترین اندازه‌ها و فراوانی بارش‌های یک، دو و سه روزه و همچنین ماهانه بارش استان همدان را در دوره آماری ۲۰۱۳-۱۹۷۷ ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که بیشترین تأثیر در ماه‌های مهر، آبان، آذر، بهمن، فروردین و اردیبهشت بود. در فصل پاییز تأثیر نشانک‌های اقلیمی MEI، NINO1+2، NINO3، NINO3.4، NINO4 و ONI بر بارش بیش از دیگر نشانک‌های اقلیمی مطالعه‌شده بود. همچنین بررسی بیشترین بارش ۱، ۲ و ۳ روزه و فراوانی روزهای بارش ۱ و ۲ روزه نشان داد که در ماه‌های گوناگون بیشترین تأثیرپذیری از نشانک‌های اقلیمی MEI، NINO4، NINO3.4، NINO3، NINO1+2 و ONI بود.

سرانجام می‌توان گفت که کمبود بارش در بلندمدت به تدریج محیط را تسخیر کرده و در شرایط نبودن ارزیابی مناسب از گرانیگاه آن در شبکه باران‌سنجی در مقیاس محلی و منطقه‌ای و نبودن مدیریت مبتنی بر دانش صحیح به یک بلای طبیعی تبدیل می‌شود. در سال‌های اخیر، منطقه شمال غرب کشور از جمله استان اردبیل با ناهنجاری‌های اقلیمی و افت سطح آب‌های زیرزمینی بر اثر کاهش بارش، برداشت‌های غیراصولی از منابع آب و تغییرات کاربری روبه‌رو بوده است (مصطفی‌زاده و مهری ۲۰۱۸، مصطفی‌زاده و همکاران ۲۰۲۱). این رخدادها منطقه را به‌سوی بحران آب در آینده پیش می‌برند. براین‌اساس، می‌توان با تحلیل گرانیگاه بارش ویژگی‌های توزیع بارش منطقه‌ای را نشان داد و مسیرهای پویایی منعکس‌کننده پراکندگی، انتقال و توزیع غالب بارش را برای مدیران منابع آب تبیین کرد. با توجه به این‌که تاکنون پژوهشی در این زمینه برای استان اردبیل انجام نشده است، این پژوهش با هدف ارزیابی مدل حرکت گرانیگاه بارش و رابطه آن با توزیع مکانی شبکه ایستگاه‌های استان اردبیل انجام شد. امید است تا نتایج این پژوهش در راستای توسعه

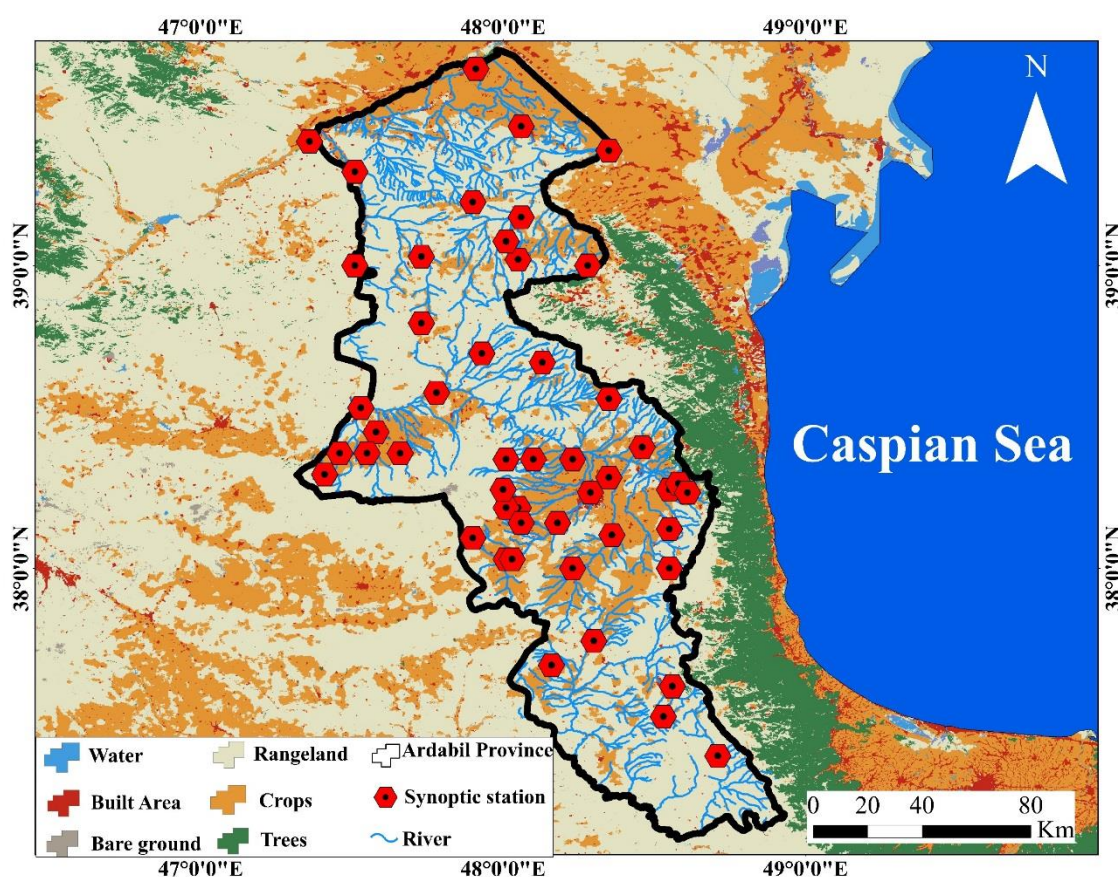
و بازنگری برنامه‌های آب‌خیزداری و آمایش سرزمین در بخش‌های گوناگون مفید باشد.

روش پژوهش

منطقه مطالعه شده

استان اردبیل در شمال غربی فلات ایران میان مختصات $37^{\circ}45'$ تا $39^{\circ}42'$ عرض شمالی و $47^{\circ}03'$ تا $48^{\circ}55'$ طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ است. این استان از شمال با جمهوری آذربایجان، از شرق با استان گیلان، از جنوب با استان زنجان و از غرب با استان آذربایجان شرقی هم‌جوار است. استان اردبیل جزء نواحی سردسیر کوهستانی به‌شمار می‌آید و اندازهٔ نزولات جوی آن به‌طور

میانگین میان ۲۵۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر در سال نوسان دارد (خروشی و همکاران ۲۰۱۷). تعداد روزهای همراه با بارش در شهر اردبیل به‌طور میانگین برابر با ۱۰۰ روز در سال است. میانگین سالانهٔ بارش در غرب، جنوب و شمال استان به‌ترتیب در حدود ۴۰۰-۵۰۰ میلی‌متر، ۳۵۰ میلی‌متر و ۲۴۰-۲۱۰ میلی‌متر برآورد شده است. کمترین و بیشترین روزهای بارش نیز به‌ترتیب مربوط به شمال و شرق استان است (مصطفی‌زاده و مهری ۲۰۱۸، مصطفی‌زاده و همکاران ۲۰۲۱). نمایی کلی از استان اردبیل و موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی بررسی‌شده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نمایی کلی از استان اردبیل و موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی بررسی‌شده.

Figure 1- A general view of Ardabil Province and the location of the investigated rain gauge stations.

مدل مرکز ثقل

در این پژوهش، برای تجزیه و تحلیل تفاوت و تعادل بارش در استان اردبیل، مدل مرکز ثقل برای تجزیه و

تحلیل تجمع، حرکت و توزیع غالبیت بارش استفاده شد. در این مدل، گرانیگاه بارش با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه شد (ما و همکاران ۲۰۲۰).

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (2)$$

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n x_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (1)$$

یک دوره معین، از روش بیضی انحراف استاندارد برای تحلیل جهت و روند توزیع آن به شرح مراحل زیر استفاده شد (یوان و همکاران ۲۰۲۰):
مرحله ۱: مرکز بیضی با استفاده از رابطه های ۳ تا ۶ مشخص شد:

X و Y: نشان دهنده مختصات طول و عرض جغرافیایی گرانیگاه بارش، X_i و Y_i : مختصات طول و عرض جغرافیایی ایستگاه باران سنجی، i و P_i : اندازه بارش ایستگاه باران سنجی i است.

بیضی انحراف استاندارد (SDE)

در این پژوهش، برای یک خوشه از نقاط ثقل بارش در

$$\bar{X} = \frac{(\sum_{i=1}^N X_i)}{N}, \quad (5)$$

$$SDE_x = \sqrt{\frac{[\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2]}{N}}, \quad (3)$$

$$\bar{Y} = \frac{(\sum_{i=1}^N Y_i)}{N} \quad (6)$$

$$SDE_y = \sqrt{\frac{[\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2]}{N}} \quad (4)$$

مرحله ۲: زاویه جهت بیضی θ با استفاده از رابطه های ۷ تا ۱۰ تعیین شد:

$$B = \sqrt{(\sum_{i=1}^N \tilde{X}_i^2 - \sum_{i=1}^N \tilde{Y}_i^2)^2 + 4 (\sum_{i=1}^N \tilde{X}_i \tilde{Y}_i)^2} \quad (9) \quad \tan \theta = \frac{A+B}{C} \quad (7)$$

$$C = 2 \sum_{i=1}^N \tilde{X}_i \tilde{Y}_i \quad \tilde{X}_i = X_i - \bar{X}, \tilde{Y}_i = Y_i - \bar{Y} \quad (10) \quad A = (\sum_{i=1}^N \tilde{X}_i^2 - \sum_{i=1}^N \tilde{Y}_i^2) \quad (8)$$

مرحله ۳: طول محورهای اصلی و فرعی بیضی از روی رابطه های ۱۱ و ۱۲ محاسبه می شود:

$$\sigma_y = \sqrt{2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\tilde{X}_i \sin \theta + \tilde{Y}_i \cos \theta)^2}{N}} \quad (12) \quad \sigma_x = \sqrt{2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\tilde{X}_i \cos \theta - \tilde{Y}_i \sin \theta)^2}{N}}, \quad (11)$$

در توزیع مکانی شبکه های ایستگاهی گوناگون است. هر چه ضریب همبستگی متعارف بزرگ تر باشد، اندازه نظری گرانیگاه بارش به اندازه واقعی تقریبی نزدیک تر است (یوان و همکاران ۲۰۲۰). در این پژوهش، برای تحلیل همبستگی متعارف (CCA) از XLSTAT استفاده شد. برای اندازه های طول و عرض جغرافیایی به دست آمده در بخش گرانیگاه های بارش، ضریب همبستگی متعارف برای سال های گوناگون استخراج شد (رابطه ۱۳).

X_i و Y_i : مختصات طول و عرض جغرافیایی گرانیگاه بارش، SDE_x و SDE_y : مختصات مرکزی بیضی، $\tilde{X}_i$ و $\tilde{Y}_i$: به ترتیب تفاوت میان میانگین حسابی طول و عرض مختصات گرانیگاه بارش، σ_x و σ_y : به ترتیب طول محورهای اصلی و فرعی بیضی، N : تعداد گرانیگاه های بارش است.

تحلیل همبستگی متعارف (CCA)

تجزیه و تحلیل همبستگی متعارف (CCA) نشان دهنده نزدیکی میان گرانیگاه بارش نظری و گرانیگاه واقعی تقریبی

$$\rho = \frac{a^T \sum_{XY} b}{\sqrt{a^T \sum_{XX} a} \sqrt{b^T \sum_{YY} b}} \quad C = \sum_{XX}^{1/2} a, \quad d = \sum_{YY}^{1/2} b \quad (13)$$

و یکنواختی، پنج ایستگاه به عنوان کمترین تعداد ایستگاه تعیین شدند. سپس، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ایستگاه به شکل تصادفی استخراج شدند تا توزیع گرانیگاه بارندگی با تراکم شبکه ایستگاه ها مقایسه شود.

گرانیگاه بارش، که از آمار بارش ۴۹ ایستگاه هواشناسی در دوره آماری ۴۶ ساله (۱۳۹۵-۱۳۵۰) محاسبه شد، اندازه واقعی تقریبی نامیده می شود. بر اساس اصل استخراج ایستگاه و با در نظر گرفتن منطقی بودن کمترین تراکم

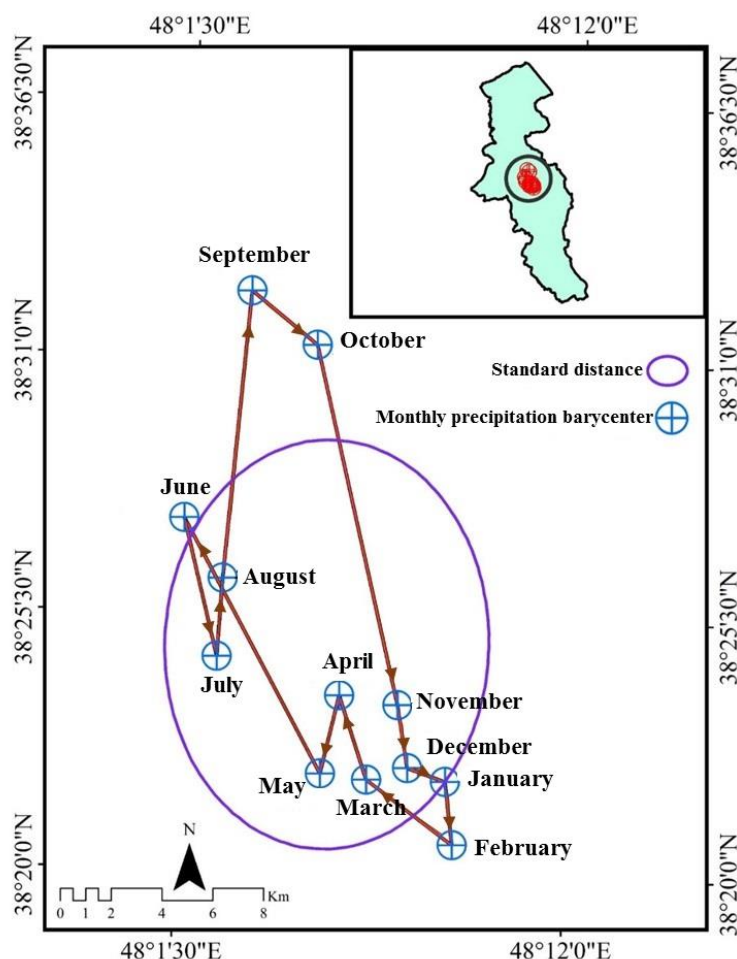
نتایج و بحث

نتایج پراکنش گرانیگاه بارش ماهانه

گرانیگاه بارش ماهانه در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین، جهت حرکت و فاصله برای هر ماه نسبت به ماه پیشین در جدول ۱ آورده شده است. برای تجزیه و تحلیل بهتر جهت و پراکندگی گرانیگاه بارش ماهانه در استان اردبیل، یک بیضی انحراف استاندارد سطح اول برای ۱۲ گرانیگاه بارش ایجاد شد. نتایج نشان داد که گرانیگاه‌های بارش ماهانه در استان اردبیل عمدتاً در شهر اردبیل و مشگین‌شهر توزیع شده‌اند (شکل ۲). گرانیگاه بارش دی کمترین فاصله (۱/۵۸ کیلومتر) و در خرداد بیشترین فاصله (۱۴/۶۱ کیلومتر) را پیمود. جهت حرکت گرانیگاه بارش در ماه‌های مهر، آبان، آذر، بهمن، اردیبهشت و تیر به

سمت جنوب بود.

در بهار (فروردین تا خرداد)، جهت حرکت گرانیگاه بارش به‌طور قابل توجهی تغییر کرد. هیچ جهت اصلی وجود نداشت و فاصله حرکت ۱۸/۱۷ کیلومتر بود. در تابستان (تیر تا شهریور)، گرانیگاه بارش عمدتاً ۲۰/۱۸ کیلومتر به سمت شمال حرکت کرد. در پاییز (مهر تا آذر)، گرانیگاه بارش عمدتاً ۲۰/۴۸ کیلومتر به سمت جنوب حرکت کرد و بیشترین فاصله حرکت در مقایسه با دیگر فصل‌ها در فصل پاییز بود. در زمستان (دی تا اسفند)، گرانیگاه بارش در جهت‌های متفاوت حرکت کرد و کمترین فاصله حرکت (۸/۳۵ کیلومتر) در مقایسه با دیگر فصل‌ها در فصل زمستان بود (جدول ۱).



شکل ۲- گرانیگاه بارش ماهانه و جهت حرکت آن.

Figure 2- Monthly precipitation barycenter and its movement direction.

جدول ۱- جهت و فاصله حرکت بارش ماهانه در ایستگاه‌های باران‌سنجی استان اردبیل.

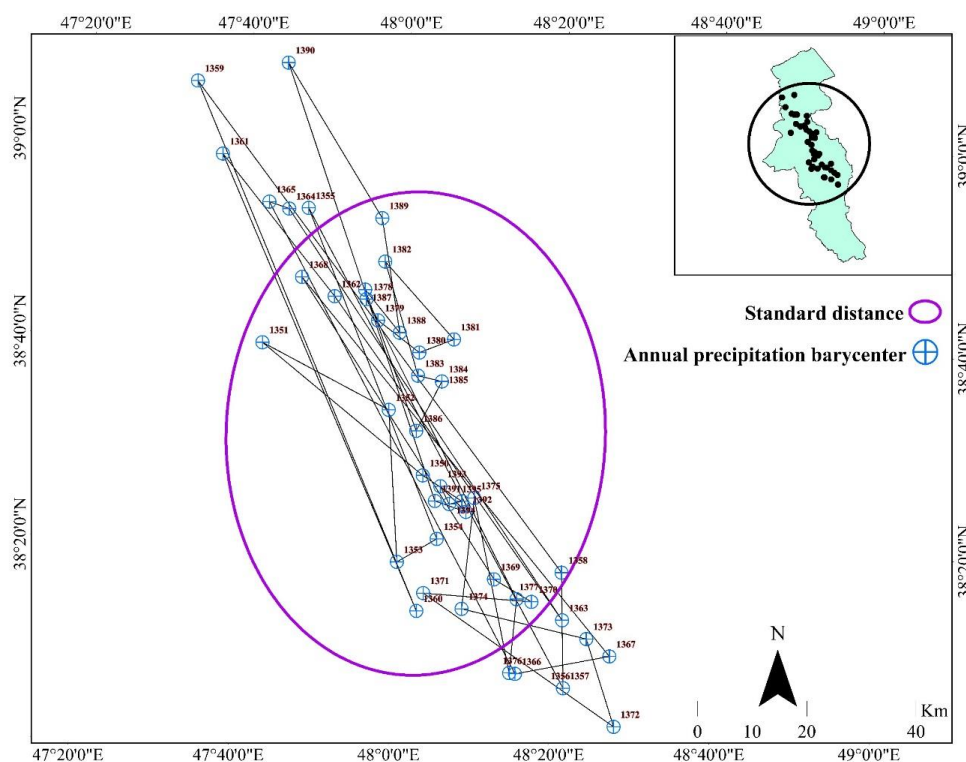
Table 1- The direction and distance of monthly precipitation migration in the rain gauge stations of Ardabil Province.

Month	Longitude	Latitude	Movement direction	Movement distance (km)
October	48.08	38.52	Northeast	3.35
November	48.12	38.39	Southeast	14.61
December	48.13	38.37	Southeast	2.52
January	48.15	38.37	East	1.58
February	48.15	38.34	Southeast	2.52
March	48.11	38.37	Southwest	4.25
April	48.10	38.40	Northwest	3.50
May	48.09	38.37	Southeast	3.19
June	48.02	38.46	Northwest	11.48
July	48.04	38.41	Southeast	5.65
August	48.04	38.44	Northwest	3.11
September	48.05	38.54	Northwest	11.43

نتایج پراکنش گرانیگاه بارش سالانه و دهک

حرکت گرانیگاه بارش سالانه در استان اردبیل از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۵ در شکل ۳ نشان داده شده است. برای تجزیه و تحلیل کمی روند جهت حرکت و خوشه‌بندی گرانیگاه بارش، یک بیضی انحراف استاندارد مرتبه اول با ۴۶ گرانیگاه بارش ایجاد شد. نتایج نشان داد که گرانیگاه‌های سالانه بارش در استان اردبیل عمدتاً در شهر اردبیل، مشگین‌شهر،

گرمی، نیر و نمین توزیع شده‌اند (شکل ۳). گرانیگاه بارش سالانه اکثراً در جهت جنوب‌شرقی حرکت کرد. بیشترین فاصله حرکت گرانیگاه ۱۱۱/۷۸ کیلومتر به سمت شمال غربی در سال ۱۳۵۸ بود. بنابراین، جهت حرکت گرانیگاه بارش سالانه در استان اردبیل در دو دهه ۱۳۵۰-۱۳۶۰ اکثراً به سمت شمال‌غربی و در دیگر دهه‌ها به سمت جنوب‌شرقی بود.



شکل ۳- مسیر حرکت گرانیگاه بارش سالانه در استان اردبیل از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۵.

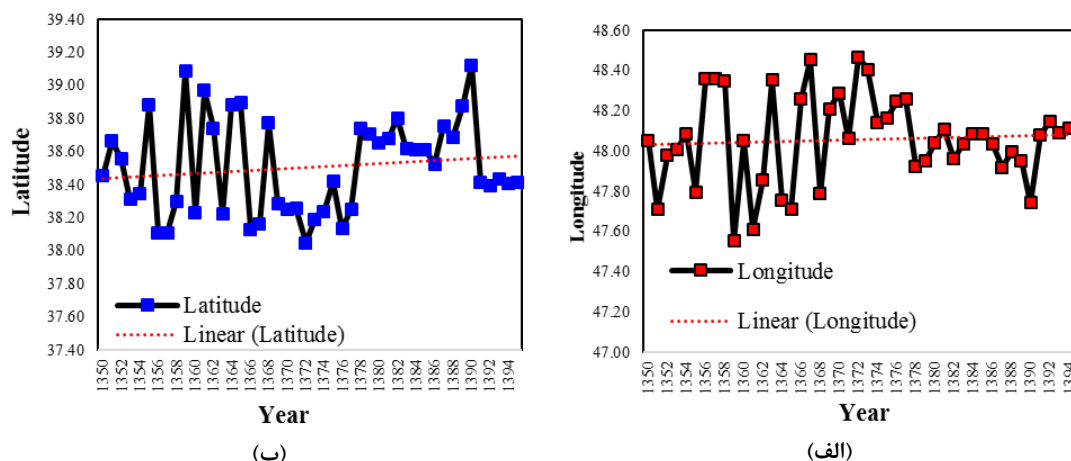
Figure 3- Migration path of annual precipitation barycenter in Ardabil Province from 1971 to 2016.

جغرافیایی توزیع شدند. همچنین، مشخص شد که از ۴۶ سال بررسی‌شده، سال‌های ۱۳۵۱، ۱۳۵۲، ۱۳۵۵، ۱۳۵۹، ۱۳۶۱، ۱۳۶۲، ۱۳۶۴، ۱۳۶۵، ۱۳۶۸، ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۵، ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰ میان ۳۸/۴۰ تا ۳۹/۱۰ متر عرض جغرافیایی بودند. سال‌های ۱۳۵۰ و ۱۳۸۶ در ۳۸/۴۰ متر عرض جغرافیایی و دیگر سال‌ها میان ۳۸/۰۰ تا ۳۸/۴۰ متر عرض جغرافیایی بودند. تغییرات فاصله میان گرانیگاه بارش و ضریب همبستگی متعارف در ایستگاه‌های باران‌سنجی در شکل ۵ نشان داده شده است.

با افزایش فاصله شبکه ایستگاه‌ها، ضریب همبستگی متعارف افزایش یافت. اندازه‌های تغییرات ضریب همبستگی متعارف در فاصله صفر تا ۰/۱۶ کیلومتر، میان صفر تا ۰/۱۳ به‌دست آمد. هر چه توزیع فاصله ایستگاه‌های باران‌سنجی یکنواخت باشد اندازه‌های همبستگی هم افزایش می‌یابد. روند تغییرات فاصله و ضریب همبستگی متعارف افزایشی بود (شکل ۵).

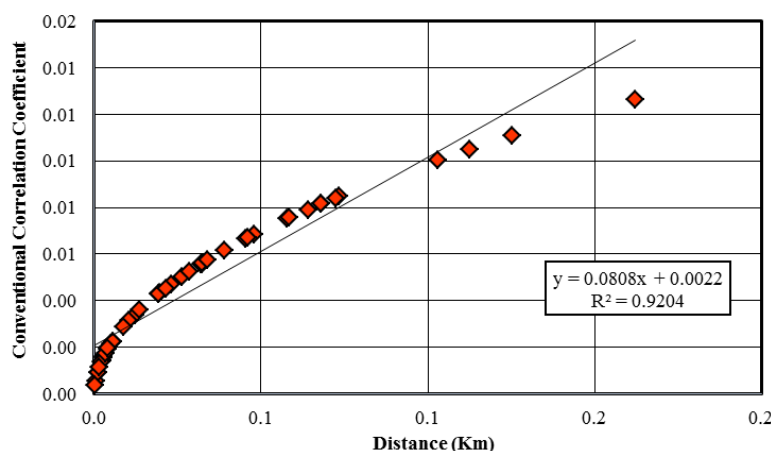
بر اساس شکل ۳، حرکت گرانیگاه بارش در دهه ۱۳۵۰ تا ۱۳۶۰ با طول ۵۰۵/۸۲ کیلومتر به سمت شمال‌غربی و در دهه ۱۳۶۰ تا ۱۳۷۰ با طول ۵۶۷/۶۵ کیلومتر عمدتاً به سمت جنوب‌شرقی بوده است. همچنین، جهت حرکت گرانیگاه بارش در دهه ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۰ با طول ۲۴۲/۹۹ کیلومتر به سمت جنوب‌شرقی بود. جهت حرکت گرانیگاه در دهه ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ با طول ۱۳۰/۳۴ کیلومتر عمدتاً به سمت جنوب‌شرقی و در دوره ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵ با طول ۱۳۸/۱۴ کیلومتر به سمت جنوب‌شرقی بود.

نتایج تحلیل ۴۶ سال بررسی‌شده نشان داد که سال‌های ۱۳۵۴، ۱۳۵۶ تا ۱۳۵۸، ۱۳۶۳، ۱۳۶۶، ۱۳۶۷، ۱۳۶۹، ۱۳۷۰، ۱۳۷۲ تا ۱۳۷۷، ۱۳۸۱، ۱۳۹۲، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ میان ۴۸/۰۰ تا ۴۸/۵۰ متر طول جغرافیایی بودند و سال‌های ۱۳۵۰، ۱۳۶۰، ۱۳۷۱، ۱۳۸۴، ۱۳۸۵، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ در ۴۸/۰۰ متر طول جغرافیایی بودند (شکل ۴). دیگر سال‌ها نیز میان ۴۷/۵۵ تا ۴۸/۵۰ متر طول



شکل ۴- تغییرات (الف) طول جغرافیایی و (ب) عرض جغرافیایی گرانیگاه بارش از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۵.

Figure 4- Changes in (a) longitude and (b) latitude of the precipitation barycenter from 1971 to 2016.



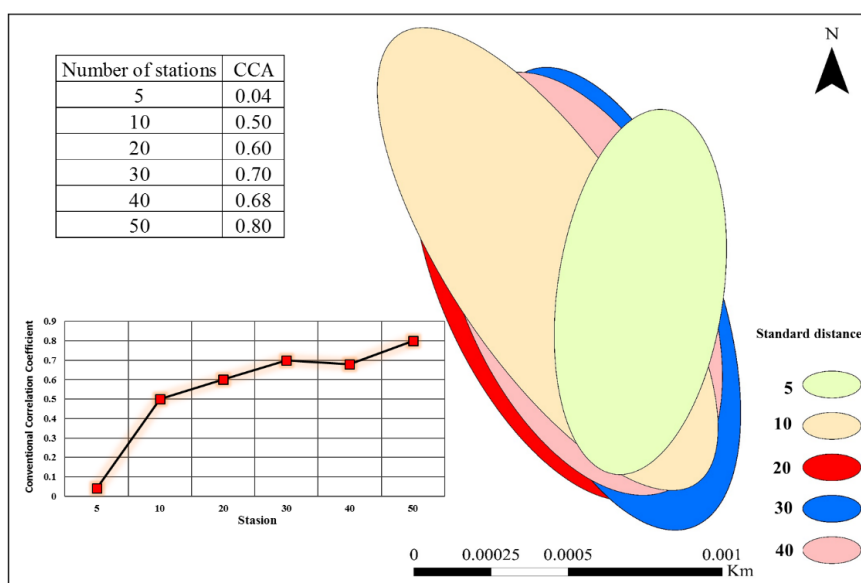
شکل ۵- تغییرات فاصله میان گرانیگاه بارش و ضریب همبستگی متعارف در ایستگاه‌های باران‌سنجی.

Figure 5- Changes in the distance between the precipitation barycenter and the conventional correlation coefficient in rain gauge stations.

گرانیه‌گاه بارش به‌طور کلی به سمت شمال غربی حرکت کرد. توزیع مکانی عموماً در جهت شمال غربی بود. اندازه بیضی انحراف استاندارد از طول ۴۸/۲۵ در تراکم ۵ به ۴۸/۰۵ در تراکم ۴۰ ایستگاه رسید. بر اساس نتایج تغییرات در تراکم شبکه‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ در طول‌های جغرافیایی به ترتیب ۴۸/۲۵، ۴۷/۹۵، ۴۷/۹۷، ۴۸/۱۶، ۴۸/۰۶ متر و در عرض جغرافیایی ۳۸/۴۸، ۳۸/۵۹، ۳۸/۵۰، ۳۸/۴۶ و ۳۸/۵۱ متر تغییر کرد. همچنین، از عرض ۳۸/۴۸ به ۳۸/۵۱ حرکت کرد. برای تراکم‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ تقریباً ۲ متر تغییر مسیر داد. نتایج نشان داد که تراکم بیش‌تر شبکه ایستگاه‌ها جهت حرکت بیضی انحراف استاندارد را به یک سمت واحد سوق داد.

تغییرات ضریب همبستگی متعارف در تراکم‌های گوناگون شبکه ایستگاهی

در این پژوهش، پنج گروه از توزیع شبکه ایستگاه‌ها با تراکم گوناگون (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰) انتخاب شد و بیضی انحراف استاندارد در هر سطح از تراکم رسم شد و ضریب همبستگی متعارف آن‌ها محاسبه شد (شکل ۶). نتایج نشان داد که شکاف مکانی برای گرانیه‌گاه بارش در تراکم شبکه ۵ می‌تواند به ده‌ها کیلومتر برسد و جهت و پراکندگی گروه نقطه گرانیه‌گاه بارش تا حدودی متفاوت بود. بیضی انحراف استاندارد گرانیه‌گاه بارش عمدتاً میان ۴۳/۲۵ متر شمالی و ۳۸/۴۸ متر جنوبی بود. افزون بر این، با افزایش تراکم شبکه ایستگاه‌ها، بیضی انحراف استاندارد

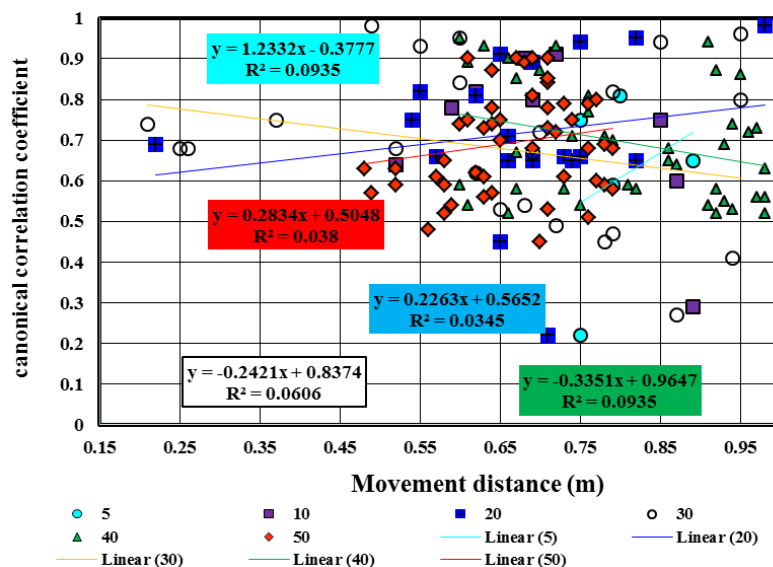


شکل ۶- تغییرات ضریب همبستگی متعارف (CCA) و مسیر حرکت بیضی انحراف استاندارد تحت تغییرات تراکم ایستگاه‌ها.

Figure 6- Changes in the canonical correlation coefficient (CCA) and the migration path of the standard deviation ellipse under stations density variation.

تراکم شبکه ایستگاه‌ها کم‌تر باشد، نقاط در نمودار پراکنده‌تر شده و روند ضریب همبستگی متعارف آن‌ها کاهشی خواهد شد. همچنین، هرچه شبکه ایستگاه‌ها یکنواخت‌تر باشد، ضریب همبستگی متعارف، بیش‌تر می‌شود.

تغییرات ضریب همبستگی متعارف و فاصله تحت تأثیر تراکم شبکه ایستگاه‌های هواشناسی گوناگون در شکل ۷ نشان داده شده است. روند ضریب همبستگی متعارف در تراکم شبکه ایستگاه‌های گوناگون، افزایشی بود. هرچه



شکل ۷- تغییرات ضریب همبستگی متعارف بر اساس فاصله حرکت تحت تأثیر تراکم‌های گوناگون از شبکه باران‌سنجی.
Figure 7- Changes of the canonical correlation coefficient based on the movement distance under the influence of different densities of the rain gauge network.

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به این که بارش یکی از مؤلفه‌های مهم چرخه آب‌شناسی در مقیاس آب‌خیز است و اندازه و شدت آن در مقیاس‌های زمانی و مکانی گوناگون تغییر می‌کند، از این رو، شناخت تغییرات گرانیگاه آن در مدیریت جامع آب‌خیزهای کشور به‌ویژه از دیدگاه منابع آب اهمیت ویژه‌ای دارد. در استان اردبیل به سبب وجود شرایط خاص و راهبردی از نظر منابع آبی و تولید محصولات آب‌بر کشاورزی و دامی این اهمیت دوچندان است. همان‌گونه که در منابع گوناگون (ژائو و همکاران ۲۰۱۸؛ وانگه و همکاران ۲۰۲۰، لینگ و همکاران ۲۰۲۱) گزارش شده است، گرانیگاه پراکندگی مکانی بارش (مرکز ثقل یا مرکز میانگین) نشان‌دهنده نقطه‌ای است که در آن بارندگی محدوده مطالعه شده به تعادل می‌رسد و گشتاور ناشی از میدان گرانشی در مرکز ثقل، برابر با صفر است. در این پژوهش، گرانیگاه‌های بارش و فاصله حرکت آن‌ها در ماه‌های گوناگون کاملاً متفاوت بود. برای نمونه، گرانیگاه بارش در دی کمترین فاصله (۱/۵۸ کیلومتر) و در خرداد بیشترین فاصله (۱۴/۶۱ کیلومتر) را پیمود. جهت حرکت گرانیگاه بارش در ماه‌های مهر، آبان، آذر، بهمن، اردیبهشت و تیر به سمت جنوب بود. همچنین، جهت حرکت گرانیگاه بارش در دو ماه متوالی مرداد و شهریور به سمت شمال و سرانجام، در اسفند به سمت شمال‌غربی و در دی به سمت جنوب بود. ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) دلیل اختلاف در حرکت نقاط گرانیگاه بارش ماهانه را به گردش بادها نسبت دادند؛ به‌طوری که آنها گزارش کردند شدت تأثیر گردش باد نقش مهمی در توزیع بارش منطقه‌ای داشت. بر این اساس با توجه به

بادخیز بودن برخی مناطق در استان اردبیل، می‌توان این مسئله را در پژوهش جداگانه‌ای بررسی کرد. در این پژوهش، گرانیگاه بارش ماهانه در جهت جنوب‌شرقی-شمال‌غربی در مقایسه با شمال‌شرقی-جنوب‌غربی پراکندگی بیشتری نشان داد. این افزایش ناهمگنی در توزیع مکانی گرانیگاه بارش ماهانه ممکن است در افزایش تهدیدهای خشکسالی و سیل اثرگذار باشد. برای تصمیم‌گیری در زمینه اقدام‌های بهتر در راستای مهار بلاهای طبیعی و کاهش اثرات فعالیت‌های انسانی در استان اردبیل، مدیران و مسئولان امر بایستی به این گونه تغییرات باید به‌عنوان یک خطر برای محیط زیست به‌ویژه در آبخیزهای شهری پرجمعیت توجه نمایند. در این راستا، در تحلیل فراوانی و توزیع گرانیگاه بارش‌های تابستانه در ۵۴۰ ایستگاه در محدوده زاگرس جنوبی، بیشترین فراوانی گرانیگاه بارش از نظر زمانی، مردادماه بود. همچنین، در ارزیابی رفتار عمومی بارش دشت مشهد نتایج نشان داد که گرانیگاه بارش سالانه نیم‌قرن اخیر دشت مشهد ۳/۸۳ کیلومتر جابه‌جایی داشته است و توزیع جهت‌دار گویای بزرگی اثر شیب و جهت‌گیری آن بر اندازه بارش بوده است (فلاح‌قاله‌ری و کدخدا ۲۰۱۷).

از نظر مقیاس بارش سالانه، مفهوم مرکز ثقل تعیین می‌کند که توزیع گرانیگاه بارش به ناحیه‌ای با بارش بیش‌تر گرایش دارد (لینگ و همکاران ۲۰۲۱). تمرکز گرانیگاه‌های سالانه بارش بیش‌تر در شهر اردبیل، مشگین‌شهر، گرمی، نیر و نمین مشاهده شد. بیضی‌های استاندارد ماهانه و سالانه نیز بخش‌های مرکزی استان را عمدتاً در بر گرفته‌اند. هر چند اندازه بیضی استاندارد در مقیاس سالانه بزرگ‌تر از

افزایش تراکم بیشتر از ۱۱۰ ایستگاه افزایش قابل توجهی در اندازه‌ی ضریب همبستگی ایجاد نکرد. بر پایه‌ی نتایج این پژوهش، می‌توان گفت که حرکت الگوی توزیع مکانی گرانیگاه‌های بارش ماهانه شمال غربی-جنوب شرقی بود. این تغییر جهت در گرانیگاه بارش بر تغییر رفتار مؤلفه‌های آب‌شناختی (رواناب و فرسایش خاک) به‌ویژه در آبخیزهای نابودشده یا با پاسخ آب‌شناختی سریع، تأثیرگذار خواهد بود (لیو و همکاران ۲۰۱۲؛ سان و لوتز ۲۰۲۰). همچنین، توزیع عمده‌ی گرانیگاه‌های بارش سالانه عمدتاً در شهر اردبیل، مشگین‌شهر، گرمی، نیر و نمین است. از میان تراکم‌های گوناگون ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰، بیشترین ضریب همبستگی متعارف با اندازه‌ی ۰/۸۰ برای تراکم ۴۰ ایستگاه به‌دست آمد و کمترین اندازه‌ی این ضریب برای کمترین تراکم ۵ ایستگاه با اندازه‌ی ۰/۰۴ بود. می‌توان نتیجه گرفت که در شرایطی که از توزیع شبکه‌ی ایستگاهی یکنواخت‌تر و متراکم‌تر، استفاده شود، ضریب همبستگی متعارف بیش‌تر شده و گرانیگاه بارش محاسبه‌شده به اندازه‌ی واقعی تقریبی نزدیک‌تر خواهد شد. بر پایه‌ی نتایج این پژوهش، تغییرات حرکت الگوهای بارش که در مدیریت منابع آبخیزهای استان اردبیل و دیگر استان‌های هم‌جوار و با شرایط مشابه، که در دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی می‌تواند مؤثر باشد، مشخص شد. پیشنهاد می‌شود برای تکمیل نتایج این پژوهش و تصمیم‌گیری در زمینه‌ی اقدام‌های راهبردی آبخیزداری، ارتباط میان مؤلفه‌های تغییر اقلیم، پوشش گیاهی و پستی‌بلندی با تغییرات مکانی-زمانی گرانیگاه بارش و عامل فرساینده‌ی باران بررسی شود.

اندازه‌ی آن در مقیاس ماهانه بود اما، هم‌جهت (جهت کلی شمالی-جنوبی) به‌دست آمد. به‌طور کلی، جهت حرکت گرانیگاه بارش سالانه به‌جز در دهه‌ی ۱۳۵۰ تا ۱۳۶۰، اکثراً در جهت جنوب شرقی بود. بر این اساس، توزیع مکانی بارش در جنوب شرقی استان اردبیل افزایش یافت و در ایستگاه‌های شمال غربی استان کاهش یافت. این‌گونه تغییرات مکانی به‌وسیله‌ی لینگ و همکاران (۲۰۲۱) نیز گزارش شده است. همچنین، بلیانی و سلیقه (۲۰۱۷) با تحلیل داده‌های ۳۷ ایستگاه در منطقه شمالی خلیج-فارس گزارش کردند که گرانیگاه و بیضی‌های استاندارد بارش در محدوده‌های پربارش و در مسیر اصلی سامانه‌های ورودی بارش بودند. این پژوهشگران گزارش کردند از آنجایی که ماه‌های اصلی بارش دی‌ماه تا اسفندماه بود، بیش‌تر بارش‌های جوی در این ماه‌ها رخ داد و با گرانیگاه‌های بارش نیز تطابق داشت. این پژوهش‌گران نیز تغییرات قابل توجهی در مرکز ثقل بارش و اندازه‌ی کشیدگی بیضی استاندارد مشاهده نکردند. یافته‌های این پژوهشگران با نتایج این پژوهش مطابقت ندارد. در این پژوهش، ضریب همبستگی متعارف متناظر بزرگ‌تر مربوط به تراکم بیش‌تر شبکه ایستگاه‌ها بود و گرانیگاه بارش محاسبه‌شده به اندازه‌ی تقریبی حقیقی نزدیک‌تر به‌دست آمد. تغییرات زیاد گرانیگاه و تغییر کشیدگی بیضی استاندارد بارش از تراکم ۵ تا تراکم ۴۰ مشاهده شد. از این‌رو می‌توان گفت که شرایط شبکه‌ی باران‌سنجی بر تغییرات مرکز ثقل بارش تأثیرگذار بود که با نتایج پژوهش‌های لینگ و همکاران (۲۰۲۱) در چین مطابقت دارد. این پژوهشگران نشان دادند که با افزایش تراکم شبکه ایستگاه‌ها از ۲۰ به ۱۹۰، ضریب همبستگی متعارف نیز افزایش یافت. هر چند

- Asakereh H, SeifiPour Z. 2013. Description of spatial structure of annual precipitation of Iran. *Geographical Research*, 28(4): 15-30. (In Persian).
- Audu MO, Ejembi E, Igbawua T. 2021. Assessment of spatial distribution and temporal trends of precipitation and its extremes over Nigeria, *American Journal of Climate Change*, 10(2021):331-352. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2021.103016>
- Balyani S, Salighe M. 2017. Exploratory spatial data analysis of monthly and seasonal precipitation changes in Mond and Helle basins. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 25(100): 111-127. (In Persian). <https://doi.org/10.22131/sepehr.2017.24810>
- Barmpas G, Kopsacheilis A, Politis I. 2017. Small scale intervention in a major city center interchange: economic, environmental and sustainability analysis. *Transportation Research Procedia*, 24(2017): 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.066>
- Burbidge R, Paling C, Dunk RM. 2024. A systematic review of adaption to climate change impacts in the aviation sector. *Transport Reviews*, 44(1): 8-33. <https://doi.org/10.1080/01441647.2023.2220917>
- Cannarozzo M, Noto LV, Viola F. 2006. Spatial distribution of rainfall trends in Sicily. *Physics and Chemistry of the Earth*, 31(18): 1201-1211. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.03.022>
- Chai D, Du J, Yu Z, Zhang D. 2022. City network mining in China's Yangtze River economic belt based on "two-way time distance" modified gravity model and social network analysis. *Frontiers in Physics*, 10(2022): 1-22. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.1018993>
- Chen S, Li L, Li J, Liu J. 2017. Analysis of the temporal and spatial variation characteristics of precipitation in the Lancang River basin over the past 55 years. *Journal of Geo-Information Science*, 19(03): 365-373. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1047.2017.00365>
- Fallah Ghalhari G, Kadkhoda E. 2017. the evaluation of the spatial structure of Mashhad Plain precipitation in the last Half-Century. *Hydrogeomorphology*, 4(11): 39-57. (In Persian). <https://doi.org/10.1001.1.23833254.1396.4.11.3.4>
- Farhadi N, Gandomkar A, Montazeri M. 2016. Analysis of the frequency and central distribution of average summer rainfall in Southern Zagros. *Geographical Notion*, 8(16): 21-41. (In Persian).
- Gong JX. 2002. Clarifying the standard deviational ellipse. *Geographical Analysis*, 34(2): 155-67. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2002.tb01082.x>
- Jalota SK, Sood A, Chahal GBS, Choudhury BU. 2006. Crop water productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.)-wheat (*Triticum aestivum* L.) system as influenced by deficit irrigation. soil texture and precipitation. *Agricultural Water Management*, 84 (1-2): 137-146. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.02.003>
- Khorooshi S, Mostafazadeh R, Esmali Ouri A. 2017. Spatiotemporal assessment of the hydrologic river health index variations in Ardabil Province Water-

- sheds. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 4(2): 379-393. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ije.2017.6147>
- Ling M, Han H, Yu L, Tang S. 2021. Precipitation barycenter and relationship to the spatial distribution of station networks on the Huang-Huai-Hai Plain, China. *Journal of Water and Climate Change*, 12(8): 3839-3850. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.353>
- Liu B, Tao H, Song C, Guo B, Shi Z. 2012. Study on annual variation of rainfall erosivity in southwest China using gravity center model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28(21): 113-120. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2012.21.016>
- Ma W, Yu Y, Meng W, Fan J. 2020. Comparative analysis of city connection network based on gravity model and Baidu Index in Wuhan urban agglomeration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 446(2020): 1-5. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/446/2/022050>
- Mostafazadeh R, Mehri S. 2018. Trends in variability of flood coefficient in river gauge stations of Ardabil Province. *Iran. Journal of Watershed Management Research*, 9(17): 82-95. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.29252/jwmr.9.17.82>
- Mostafazadeh R, Moradzadeh V, Alaei N, Hazbavi Z. 2021. Determining long-term memory using Hurst index for precipitation and discharge time series of selected stations in Ardabil Province. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 11 (2): 113-131. (In Persian). <https://doi.org/10.30495/wsrecj.2021.19217>
- Mtibaa S, Tsunetaka H. 2023. Revealing the relation between spatial patterns of rainfall return levels and landslide density. *Earth Surface Dynamics*, 11(2023): 461-474. <https://doi.org/10.5194/esurf-11-461-2023>
- Narangifard M, Fatemi M, Kamaneh A, Talebi M.S. 2020. Detection of daily precipitation structure in Shiraz Synoptic Station. *Geography and Planning*, 24(72): 385-403. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/gp.2020.1085>
- Nazaripouya H. 2022. The effect of several climatic signals on rainfall features using factor analysis and multivariate regression methods (Case of Hamadan Province, Iran). *Journal of Agricultural Meteorology*, 10(1): 17-27. (In Persian). <https://doi.org/10.22125/agmj.2022.140963.1021>
- Ren G, Ren Y, Zhan Y, Sun X, Liu Y, Chen Y, Wang T. 2015. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: II: recent trends. *Advances in Water Science*, 26(4): 451-465. <https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2015.04.001>
- Sun L, Hao Z, Wang J, Nistor I, Seidou O. 2014. Assessment and correction of TMPA products 3B42RT and 3B42V6. *Journal of Hydraulic Engineering*, 46(10): 1135-1146. <https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.2014.10.001>
- Sun Z, Lotz T. 2020. Linking meteorological patterns shift to hydrological extremes in a lake watershed across the mid-high latitude transition region. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34(2020): 1121-1134. <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01822-z>
- Tan XH, Yong B, Ren LL. 2018. Error features of the hourly GSMaP multi-satellite precipitation estimates over nine major basins of China. *Hydrology Research*,

- 49(3): 761–779. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.263>
- Tang GQ, Clark MP, Papalexiou SM, Ma ZQ, Hong Y. 2020. Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets. *Remote Sensing of Environment (RSE)*, 240 p. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111697>
- Tiwari Sh, Jha SK, Singh A. 2022. Quantification of node importance in rain gauge network: influence of temporal resolution and rain gauge density. *Scientific Reports*, 10(2020): 1-17. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66363-5>
- Tong TH, Nguyen TTN, Nguyen QK. 2023. Development of method to optimize rain gauge station location in Darang river basin using spatial interpolation technique. *Journal of Science and Technique-Section on Special Construction Engineering*, 6(02):21-36. <https://doi.org/10.56651/lqd-tu.jst.v6.n02.736.sce>
- Wang Y, Chen X, Yan F. 2015. Spatial and temporal variations of annual precipitation during pp .1960–2010 in China. *Quaternary International*, 380(2015): 5-13. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.12.047>
- Wanghe K, Guo X, Wang M, Zhuang H, Ahmad S, Khan TU, Li K. 2020. Gravity model toolbox: An automated and open-source ArcGIS tool to build and prioritize ecological corridors in urban landscapes. *Global Ecology and Conservation*, 22(2020): 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01012>
- Yuan J, Bian Z, Yan Q, Gu Z, Yu H. 2020. An approach to the temporal and spatial characteristics of vegetation in the growing season in western China, *Remote Sensing*, 12 (6): 1-16. <https://doi.org/10.3390/rs12060945>
- Zandkarimi A, Mokhtari D, Zandkarimi S. 2018. The spatial analysis and optimization of rain gauging station network in Kurdistan Province using the Kriging Error Variance. *Journal of Geographical Data (SEPEHR)*, 27(105): 115-126. (In Persian). <https://doi.org/10.22131/sepehr.2018.31479>
- Zhang L, Xin Z, Zhou H. 2020. Assessment of TMPA 3B42V7 and PERSIANN-CDR in driving hydrological modeling in a semi-humid watershed in northeastern China. *Remote Sensing*, 12 (19): 1-20. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12193133>
- Zhao Z, Luo Y, Yu J, Luo X, Yang Y. 2018. Analysis of precipitation variation characteristics and barycenter shift in Guizhou Plateau during 1960–2016, *Journal of Geo-Information Science*, 20 (10): 1432–1442. <https://doi.org/10.12082/dqxxkx.2018.180215>
- Zhou W, Zhu, Z, Xie Y, Cai Y. 2021. Impacts of rainfall spatial and temporal variabilities on runoff quality and quantity at the watershed scale. *Journal of Hydrology*, 603 (2021): 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127057>



Fars Agricultural and Natural Resources
Research and Education Center



Agricultural Research, Education
and Extension Organization

An Analysis on the Precipitation Barycenter in the Network of Rain Gauge Stations of Ardabil Province

Zeinab Hazbavi ^{*1}, Vahideh Moradzadeh ², Mahin Hanifepour ³, Nazila Alaei ⁴

- 1- Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
- 2- Former M.Sc. Student, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
- 3- Former Ph.D. Student, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
- 4- Ph.D. Student, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

The decreasing trend of precipitation in many regions of the country, including the northwestern provinces, has made it more necessary to investigate new methodologies to complete the databases of the country's watersheds. In this regard, understanding the changes in precipitation barycenters, as an emerging concept, that indicates the long-term spatial distribution of regional precipitation is especially important for the administration of watershed management issues such as reducing drought effect, flood control, and water resource conservation. To this end, the present study analyzes the precipitation barycenter and its relationship with the spatial distribution of the rain gauge network in Ardabil Province.

Materials and Methods

To calculate the precipitation amount, the statistics of 49 meteorological stations during the statistical period of 45 years (1971-2016) were used. Based on the principle of station extraction and considering the rationality of the lowest density and uniformity, five stations were determined as the minimum possible number. Then, densities of 10, 20, 30, and 40 stations were extracted randomly to compare the distribution of precipitation centroids with the density of the station network. The statis-

Article Type: Research Article

*Corresponding Author E-mail: z.hazbavi@uma.ac.ir

Citation: Hazbavi, Z., Moradzadeh, V., Hanifepour, M., Alaei, N. 2024. An Analysis on the Precipitation Barycenter in the Network of Rain Gauge Stations of Ardabil Province. *Watershed Management Research*. 37(4): 54-70.

DOI: 10.22092/WMRJ.2024.364724.1570

Received: 19 December 2023, **Received in revised form:** 30 January 2024, **Accepted:** 20 February 2024

Published online: 01 January 2025

Watershed Management Research, VOL. 37, No.4, Ser. No:145, Winter 2025, pp.54-70.

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



tics above were used to implement the gravity center model, calculate the standard deviation ellipse in the ArcMap 10.8 software environment, and conventional correlation analysis on monthly, seasonal, and annual time scales using XLSTAT.

Results and Discussion

The results showed that in spring (April to June), the direction of movement of the precipitation barycenter was significantly different and the movement distance was 18.17 km. In summer (July to September), the precipitation barycenter mainly moved 20.18 km to the north. In autumn (October to December), the precipitation barycenter mainly moves 20.49 km to the south and has the longest movement distance among the seasons. In winter (December to March), the precipitation barycenter moves in different directions and has the smallest movement distance (8.35). The annual precipitation barycenter migrated mostly in the southeast direction. The maximum migration of barycenter for 1979 was towards the northwest with 111.78 km. Besides, the annual precipitation barycenter in Ardabil Province in the three decades of 1971-1981 migrated mostly to the northwest and in the other decades to the southeast. The station network density was positively correlated with changes in the precipitation barycenter ($CCA = 0.65$ at a significance level of 5%).

Conclusion and Suggestion

The highest conventional correlation coefficient of 0.80 was obtained for the density of 40 stations among different densities of 5, 10, 20, 30, 40, and 50, and the lowest coefficient of 0.04 was obtained for the minimum density of 5 stations. Based on the results of this study, changes in the movement of precipitation patterns that can be effective in drought and wet periods were identified. It is suggested that the relationship between climate change and elevation factors with spatial-temporal changes in the precipitation center of gravity be investigated.

Keywords: Clustering, Migration direction, Mountainous watersheds, Spatial pattern, Stational density



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

ارزیابی فرسایش آبکندی با استفاده از مدل‌های وزن شاهد (WofE) و دمپستر-شیفر (DSH) در آبخیز ایلام

شمس‌اله عسگری^{۱*}، کوروش شیرانی^۲، فریدون سلیمانی^۳

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

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

فرآیند مدل‌سازی برای هر پدیده یا متغیر وابسته با استفاده از عامل‌های مؤثر محیطی (متغیرهای مستقل) می‌تواند افزون بر تعیین وضعیت شرایط حال، قابل تعمیم به آینده نیز باشد. از این رو، فرض اولیه در تمام مدل‌سازی‌های محیطی، مبتنی بر اصل یکنواختی است که برای هدف این پژوهش نیز قابل تعمیم است و سنجش‌های پستی‌بلندی از عامل‌های اصلی در ایجاد و گسترش فرسایش آبکندی هستند. این پژوهش با هدف تعیین اندازه صحت نقشه‌های حساسیت به فرسایش آبکندی بر اساس مدل‌های وزن شاهد و دمپستر-شیفر با استفاده از منحنی ویژگی عملکرد نسبی یا گیرنده (AUC و ROC) انجام شد. همچنین، آستانه‌های عامل‌های مؤثر (شامل شاخص‌های پستی‌بلندی و عامل‌های محیطی مدنظر) بر رخداد فرسایش آبکندی در آبخیز ایلام تعیین شد.

مواد و روش‌ها

آبخیز ایلام در استان ایلام و در جنوب غربی ایران است. در این پژوهش برای تعیین آستانه‌ها و پهنه‌بندی حساسیت‌پذیری فرسایش آبکندی از مدل‌های پیشینه وزن شاهد و دمپستر-شیفر استفاده شد. این پژوهش، در

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: shamsasgari@yahoo.com

استناد: عسگری، ش.، شیروانی، ک.، سلیمانی، ف. ۱۴۰۳. ارزیابی فرسایش آبکندی با استفاده از مدل‌های وزن شاهد (WofE) و دمپستر-شیفر (DSH) در آبخیز ایلام. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۷ (۴): ۷۱-۹۸.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2024.364768.1571

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۳، دوره ۳۷، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۴۵، زمستان ۱۴۰۳، صفحه‌های ۷۱ تا ۹۸.

©نویسندگان

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



هفت گام اصلی انجام شد. در گام اول منطقه پژوهشی انتخاب شد و نقشه پراکنش رخداد آبکندها (متغیر وابسته) تهیه شد و داده‌ها به شکل تصادفی به دو دسته آموزشی یا واسنجی (۷۰٪) و دسته آزمایشی یا پیش‌بینی (۳۰٪) تقسیم شدند. در گام دوم نقشه‌های ۲۲ عامل مؤثر (متغیرهای مستقل) تهیه و آماده‌سازی شد. در گام سوم عامل‌های مؤثر با استفاده از آزمون هم‌راستایی میان عامل‌های مؤثر و رخداد آبکندها انتخاب شدند. در گام چهارم مدل‌های وزن شاهد و دمپستر-شیفر اجرا شد و نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شد. در گام پنجم اعتبارسنجی، ارزیابی، مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت به‌دست آمده از مدل‌های نامبرده در دو مرحله واسنجی و پیش‌بینی انجام شد. در گام ششم آستانه‌ها و اهمیت عامل‌های مؤثر بر اساس بهترین مدل تعیین شد. در گام هفتم نقشه پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت به رخداد فرسایش آبکند تهیه شد.

نتایج و بحث

در این پژوهش، پس از بازدیدهای میدانی، تفسیر تصویرهای هوایی و پردازش تصویر ماهواره‌ای، ۳۳۱ آبکند شناسایی و بررسی شد. نقشه پراکنش فرسایش آبکند برای ۳۳۱ آبکند تهیه و رقومی شد که از این تعداد آبکند ۷۰٪ (۲۳۲ آبکند) برای آموزش و از ۳۰٪ باقی‌مانده (۹۹ آبکند) برای اعتبارسنجی مدل وزن شاهد و دمپستر-شیفر استفاده شد. برای اعتبارسنجی مدل‌ها از منحنی مشخصه عملکرد ساختار ROC و مساحت سطح زیر منحنی AUC استفاده شد. ابتدا داده‌های به‌دست‌آمده از نقشه‌های پهنه‌بندی فرسایش آبکندی با استفاده از هر دو مدل وزن شاهد و دمپستر-شیفر به شکل جداگانه با نقاط ۹۹ آبکند و ۲۳۲ آبکند برازش داده شد. سپس، داده‌ها به فایل اکسل انتقال داده شدند و با استفاده از نرم‌افزار SPSS تحلیل و بررسی شدند. بر اساس نتایج نقاط واسنجی (۳۰٪)، در هر دو مدل درصد سطح زیر منحنی قابل قبول بود که این موضوع نشان‌دهنده عملکرد زیاد هر دو مدل در منطقه پژوهشی بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

شناسایی میدانی دقیق نقاط فرسایش آبکندی با استفاده از دستگاه جی‌پی‌اس، یکی از نتایج به‌دست آمده از این پژوهش بود. در نتیجه، نقشه پراکنش فرسایش آبکندی ۳۳۱ آبکند تهیه شد و برای اولین بار در آبخیز پژوهش‌شده بررسی و ثبت شد. یکی از مزیت‌ها و نوآوری‌های این پژوهش استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای آلوِس و نرم‌افزارهای جی‌آی‌اس و ساگا جی‌آی‌اس بود. نتایج بیانگر بیشترین استخراج متغیرهای مستقل مؤثر بر متغیر وابسته فرسایش آبکندی در سامانه آبخیز بود و ۲۲ لایه رستری تهیه شد. سرانجام، نتایج تحلیل آماری جدول رتبه‌بندی مهم‌ترین شاخص‌های ایجاد فرسایش آبکندی در منطقه نشان داد که شاخص کاربری زمین (۳۷/۱٪)، تراکم آبراهه (۱۷/۷٪)، سنگ شناسی (۱۳/۲٪)، اقلیم (۹/۴٪)، بارش (۵/۵٪) و NDVI (۳/۵٪) و دیگر شاخص‌ها به ترتیب بر فرسایش تأثیرگذار بودند. نتایج این پژوهش قابل ترویج و آموزش است و دستگاه‌های اجرایی برای مهار فرسایش آبکندی می‌توانند با استفاده از نتایج این پژوهش اقدام‌های لازم را انجام دهند.

واژگان کلیدی: آبخیز ایلام، آستانه فرسایش آبکندی، مدل دمپستر-شیفر، مدل وزن شاهد

مقدمه

استفاده از مدل‌های احتمالاتی و کمی برای ارزیابی فرسایش روی آورده‌اند (یانگ و همکاران ۲۰۱۹؛ گاین و همکاران ۲۰۱۹). در حقیقت، فرایند ارزیابی گسترش فرسایش آبکندی افزون بر بررسی‌های میدانی نیاز به تحلیل و به‌کارگیری مدل‌های کمی دارد تا صحت و دقت نتایج پهنه‌بندی را در حد زیادی ارتقاء دهد، بنابراین، مدل‌های گوناگونی در زمینه پهنه‌بندی پیشنهادشده است (لیو و همکاران ۲۰۱۸؛ روی و سها ۲۰۱۹).

داب و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از مدل وزن شاهد، خطر رخداد آبکند در کشور زیمباوه را مدل‌سازی کردند. نتایج ایشان نشان داد که رخداد آبکندهای پیشین

شکل‌گیری و تکامل آبکندها نشان‌دهنده فرآیند بسیار شدید فرسایش خاک است که اغلب در سیاست‌ها، راهبردها و مدیریت آبخیزها نادیده گرفته می‌شود. به‌رغم گسترش جهانی این پدیده، توانایی ما برای ارزیابی و شبیه‌سازی فرسایش آبکندی و اثرات آن محدود است (سیسکولینیا و همکاران ۲۰۲۴). در حقیقت، ضرورت توسعه مدل‌های مناسب و کاربردی برای شناسایی مناطق مستعد به انواع فرسایش خاک به‌ویژه فرسایش آبکندی اهمیت خاصی دارد. چنان‌که با صرف هزینه کم می‌توان از گسترش و نابودی مناطق حساس به فرسایش آبکندی جلوگیری کرد. در چند سال گذشته، پژوهش‌گران به

بیش تر تحت تأثیر سنجه های زمین سنجی (ژئومتری) و گیتاشناسی (شامل پوشش زمین، نوع خاک، فاصله از رود، فاصله از جاده، شاخص حمل رسوب، شاخص توان آبراهه و شاخص رطوبت پستی بلندی) بوده است و دقت مدل بر اساس روش منحنی مشخصه عملکرد نسبی قابل قبول بود. در آبخیز دریاچه ماکوینیا در تانزانیای، مرکز و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی ۱۰ متر و ۳۰ متر، تصویرهای گوگل ارث و برداشت مختصات آبکندهای معرف منطقه با استفاده از GPS در یک بازدید میدانی، آبکندها را ارزیابی و تحلیل کردند. این پژوهشگران نقشه پهنه بندی گسترش فرسایش آبکندی در آبخیز نامبرده را تهیه کردند. انگلری و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از یک مدل آماری چندمتغیره پیش بینی فرسایش آبکندی و شیاری در آبخیز رود سیسیل در ایتالیا به شکل کمی تحلیل و بررسی کردند. این پژوهشگران پس اعتبارسنجی داده ها با استفاده از منحنی (ROC) فرسایش آبکندی و شیاری را با دقت زیادی پیش بینی کردند. رحمتی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور و با روش تحلیل (GEOBIA) و مدل شرطی احتمال (CP) میان فرسایش آبکندی و عامل های زمین رخت شناسی در آبخیز کشکان - پلدختر، رابطه فضایی ایجاد کردند. ایشان پس از تجزیه و تحلیل و بازدید میدانی، عامل هایی چون بافت خاک، تراکم زه کشی و سنگ شناسی را مهم ترین عامل ها در ایجاد فرسایش آبکندی معرفی کردند. صابر چناری و همکاران (۲۰۱۶) پهنه بندی خطر فرسایش آبکندی را با استفاده از مدل دمپستر شیفر در آبخیز قراوه استان گلستان بررسی کردند. این پژوهشگران با جمع جبری نقشه های وزنی به دست آمده، نقشه پهنه بندی خطر فرسایش آبکندی را تهیه کردند. نتایج طبقه بندی مدل در این پژوهش نشان داد از کل پهنه های آبکندی در نظر گرفته شده برای مرحله اعتبارسنجی مدل در آبخیز قراوه ۶۸/۰۶٪ در طبقه خطر زیاد و بسیار زیاد بودند. همچنین، اعتبارسنجی مدل بر اساس منحنی مشخصه عملکرد نسبی و سطح زیر آن انجام شد و نتایج به دست آمده نشان دهنده دقت مناسب مدل دمپستر شیفر (دقت ۹۶/۱٪ و انحراف معیار ۰/۰۰۳) در پهنه بندی خطر فرسایش آبکندی منطقه مطالعه شده بود. انتظار و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از شاخص قدرت آبراهه (SPI) و داده های پستی بلندی و مدل رقومی آن، مناطق مستعد به فرسایش آبکندی در آبخیز رود دیره را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که ۵ عامل شیب، انحنای شیب، کاربری زمین ها، فاصله از جاده و سنگ شناسی از عامل های مؤثر در ایجاد آبکند بودند. طهماسبی پور و همکاران (۲۰۱۵)،

با استفاده از مدل عامل قطعیت (CF) اندازه حساسیت به فرسایش آبکندی بخش های گوناگون منطقه سیمره و نقش هر یک از عامل های محیطی را ارزیابی کردند. در این پژوهش چشم اندازهای آبکندی منطقه مطالعه شده بر اساس باز دیدهای میدانی ثبت شد و برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل به دو گروه تقسیم شد. نتایج نشان داد که دقت مدل عامل قطعیت در پیش بینی مناطق حساس به فرسایش آبکندی ۸۵/۶٪ بود. همچنین، نتایج تجزیه و تحلیل اهمیت متغیرها در این پژوهش نشان داد که عامل های خاک شناسی، سنگ شناسی و شیب زمین مهم ترین متغیرهای اثرگذار بودند. شهریور و همکاران (۲۰۱۶)، کارایی روش های گوناگون پهنه بندی فرسایش آبکندی در استان کهگیلویه و بویراحمد را تعیین کردند. نتایج این پژوهش بیانگر آن بود که روش گامای فازی (۰/۸) مناسب ترین روش برای پهنه بندی فرسایش آبکندی بود. صوفی و همکاران (۲۰۱۷)، با استفاده از رابطه میان مساحت و شیب آبخیز در بالادست نقطه ایجاد و یا پیشانی آبکندها، نوع فرآیند غالب آب شناخت مؤثر در ایجاد و گسترش آبکندها را تعیین کردند. در این پژوهش، ۳۰۰ آبکند از ۴ استان فارس، مرکزی، زنجان و گلستان انتخاب شد. نتایج این پژوهش نشان داد که رابطه توانی مساحت - شیب در هر دو حالت گسترش و ایجاد آبکند در ۳۰۰ آبکند بررسی شده از ۴ استان در سطح ۱٪ معنی دار بود. در پژوهشی شیرانی (۲۰۲۰)، با استفاده از داده کاوی روش های آماری دومتغیره دمپستر-شیفر و چندمتغیره، فرسایش آبکندی در آبخیز سمیرم در جنوب استان اصفهان ارزیابی کرد. در این پژوهش، با استفاده از نسبت ۷۰ و ۳۰٪ به ترتیب مدل سازی و اعتبارسنجی آبکندهای شناسایی شده انجام شد. نقشه های حساسیت تهیه شده به ۵ طبقه حساسیت خیلی کم تا خیلی زیاد تقسیم شدند. به منظور تعیین آستانه طبقه ها و اعتبارسنجی نقشه های پهنه بندی حساسیت به ترتیب از شاخص سطح سلول هسته (SCAI) و سطح زیر منحنی ویژگی عملکرد گیرنده (AUC-ROC) استفاده شد. در پژوهش نامبرده، نتایج روش وایزی چندمتغیره نشان داد که سنجه های کاربری زمین ها، شیب و فاصله از آبراهه بیشترین تأثیر را در رخداد آبکند داشتند. دقت مدل تلفیقی (AUC-ROC) برابر ۰/۹۴۲ بود که در مقایسه با مدل های نظریه شاهد دمپستر-شیفر (۰/۹۲۴) و وایزی چندمتغیره (۰/۸۶۴) بیشتر بود. همچنین، اندازه (SCAI) در مدل تلفیقی، روند رده های حساسیت خیلی کم به خیلی زیاد کاهشی بود که بیانگر تفکیک مناسب رده بندی حساسیت در این مدل بود. ذاکری نژاد و الوندی (۲۰۲۳)، با بازدید میدانی از منطقه مطالعه شده و نمونه برداری خاک و انجام

بود. همچنین، مساحت زیر منحنی (ROC - AUC) در حالت واسنجی مدل بیشینه آنتروپی ۰/۸۶۱ بود و در حالت اعتبارسنجی مدل بیشینه آنتروپی ۰/۸۳۷ به دست آمد. بنابراین، عملکرد مدل بیشینه آنتروپی برای پیش‌بینی مناطق مستعد به فرسایش آبکندی مناسب بود.

ارزیابی فرسایش آبکندی اهمیت بسیار زیادی دارد اما، این ارزیابی به دلیل نبود و یا دسترسی نداشتن به داده‌ها و کیفیت نامناسب آن‌ها با محدودیت روبه‌رو است. بنابراین، انجام پژوهش‌های کامل در مناطقی با ظرفیت فرسایش‌پذیری و رسوب‌گذاری، ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. از مسائل بسیار مهم در آبخیز ایلام نابودی زمین‌های کشاورزی بر اثر فرسایش آبکندی و فرسایش خاک و انباشت رسوب در سد ساخته شده در این آبخیز است که در درازمدت فرسایش آبکندی برای ساکنان این آبخیز مشکلات زیادی به وجود خواهد آورد. از این رو، ارزیابی فرسایش آبکندی آبخیز ایلام اهمیت زیادی دارد. فرض بر این است که براساس رخدادهای آبکندی گذشته می‌توان رخدادهای فرسایش آبکندی زمان حال و آینده را مدل‌سازی کرد. به طور کلی فرآیند مدل‌سازی برای هر پدیده یا متغیر وابسته با استفاده از عامل‌های مؤثر محیطی (متغیرهای مستقل) می‌تواند افزون بر تعیین وضعیت شرایط حال، قابل تعمیم به آینده نیز باشد. بنابراین، فرض اولیه در تمام مدل‌سازی‌های محیطی، مبتنی بر اصل یکنواختی است که برای هدف این پژوهش نیز قابل تعمیم است و سنجه‌های پستی‌بلندی از عامل‌های اصلی در ایجاد و گسترش فرسایش آبکندی هستند. این پژوهش با هدف تعیین اندازه صحت نقشه‌های حساسیت به فرسایش آبکندی بر اساس مدل‌های وزن شاهد و دمپستر-شیفر با استفاده از منحنی ویژگی عملکرد نسبی یا گیرنده (AUC و ROC) انجام شد. همچنین، آستانه‌های عامل‌های مؤثر (شامل شاخص‌های پستی‌بلندی و عامل‌های محیطی مدنظر) بر رخداد فرسایش آبکندی در آبخیز ایلام تعیین شد.

مواد و روش‌ها

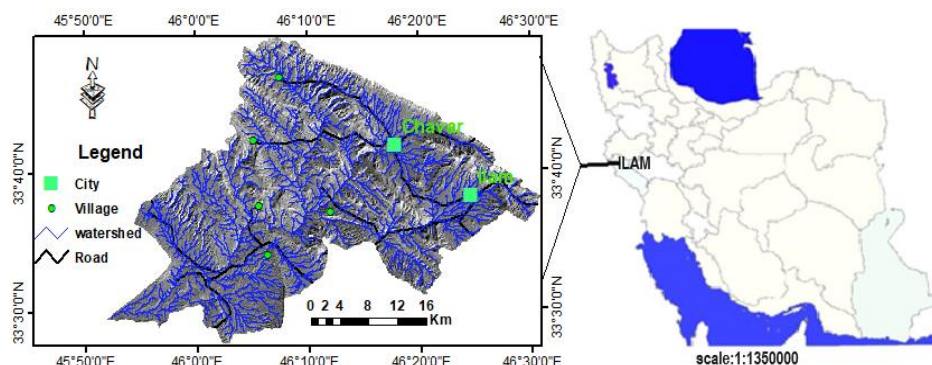
منطقه مطالعه شده

آبخیز ایلام با کد تماب ۲۱۱۹ در شمال غرب استان ایلام در موقعیت جغرافیائی ۳۳°۲۷' تا ۳۳°۴۹' عرض شمالی و ۴۵°۵۲' تا ۴۶°۳۰' درجه طول شرقی با مساحت ۱۱۹۱ کیلومتر مربع است. کمترین و بیشترین بلندی آبخیز به ترتیب ۲۰۰ و ۲۶۰۰ متر از سطح دریا است. میانگین بارندگی سالانه آبخیز ۶۳۰ میلی‌متر و میانگین بیشترین و کمترین دمای سالانه منطقه به ترتیب ۲۲/۱ و ۱۰/۲ °C

آزمایش، نقشه بافت خاک در نرم‌افزار GIS را تهیه کردند. همچنین، نقشه کاربری زمین‌ها و تراکم پوشش گیاهی با استفاده از تصاویرهای ماهواره‌ای سنیتل و لندست تهیه کردند. سپس، هر یک از شاخص‌ها به آبکندها در محیط GIS افزوده شد. برای اجرای مدل بیشینه آنتروپی از ۷۰٪ داده‌ها برای آموزش مدل و ۳۰٪ برای آزمون مدل استفاده شد. در پژوهش نامبرده، با استفاده از آزمون جک نایف اندازه تأثیر هر یک از شاخص‌ها بر دیگر شاخص‌ها مشخص شد و سرانجام تأثیرگذارترین شاخص‌ها معرفی شد. اعتبارسنجی مدل و پهنه‌بندی فرسایش آبکندی منطقه مطالعه شده با استفاده از منحنی (ROC) و مساحت زیر منحنی (AUC) ارزیابی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص بلندی و کاربری زمین‌ها و ژرفای آبراهه تأثیرگذارترین شاخص‌ها در ایجاد فرسایش آبکندی بودند و اندازه مساحت زیر منحنی (AUC=0.947) عالی بود. سلیمانی و همکاران (۲۰۲۳)، براساس بازدیدهای پی‌درپی از مناطق آبکندی استان خوزستان و نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نتیجه گرفتند که چند دلیل مهم برای ایجاد آبکندهای این منطقه وجود دارد. این پژوهشگران مهمترین عامل را ویژگی‌های ذاتی خاک گزارش کردند. بافت خاک در بیشتر آبکندها شنی لومی، سیلتی لوم و یا لوم بود که پایداری این نوع خاک هم در حالت خشک و هم در حالت تر، بسیار کم است. یوسفی‌مهرن و شیرانی (۲۰۲۳) کارایی مدل بیشینه آنتروپی در شناسایی عامل‌های مؤثر بر فرسایش آبکندی و تعیین پهنه‌های حساس در آبخیز علاء سمنان را ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که پهنه‌بندی به دست آمده از اجرای مدل بیشینه آنتروپی بیانگر آن است که مناطق مستعد به فرسایش آبکندی در مناطق بلند با واحدهای سنگی حساس (پهنه‌های رسی و مارنی کواترنری)، میانگین سالانه بارش زیاد، نوع خاک اریدسویل، اقلیم فراخشک، طبقه‌های تراکم زهکشی زیاد، شیب کم، زمین‌های پست، شاخص زیاد رطوبت پستی‌بلندی، کاربری مرتعی و سطح زمین با بافت ضعیف، شکل می‌گیرند. سعیدیان و همکاران (۲۰۲۳) عملکرد مدل بیشینه آنتروپی در تعیین اهمیت عامل‌های مؤثر محیطی در ایجاد فرسایش آبکندی در مناطق نیمه‌خشک را بررسی کردند. در پژوهش نامبرده، نقشه تهیه شده از مناطق مستعد به فرسایش آبکندی بر اثر عامل‌های محیطی نشان داد که عامل‌های محیطی در شرق، جنوب و جنوب شرقی اثرات بیشتری در کاهش فرسایش آبکندی داشتند و به سمت مرکز آبخیز و شمال و غرب آن فرسایش آبکندی افزایش یافت و اثرات عامل‌های محیطی در افزایش فرسایش آبکندی بیشتر

است و بیشتر مساحت آبخیز از زمین‌های تپه‌ماهوری، تیغ‌های فرسایشی و گیاهان پراکنده تشکیل شده است و فقط در نزدیکی مرز، قسمت‌هایی از دشت شیب ملایمی دارد. موقعیت آبخیز در نقشه ایران و استان ایلام در شکل ۱ نشان داده شده است.

است. از شمال به جنوب، اقلیم از نیمه مرطوب سرد و معتدل مدیترانه‌ای به اقلیم خشک بیابانی معتدل تغییر می‌کند. بیشترین گستردگی سازندهای زمین شناسی شامل آسماری، ایلام، پابده، گورپی، آغاچاری و گچساران با سنگ‌شناسی آهک، شیل، مارن، ماسه‌سنگ، انیدریت



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه شده.

Figure 1- Geographical location of the studied area.

چوار و ایستگاه‌های باران‌سنجی منطقه با دوره آماری ۳۰ ساله با روش درون‌یابی استفاده شد. همچنین، با استفاده از تصویر ماهواره‌ای سنیتل ۲ مربوط به سال ۲۰۲۰ و میانگین رویشی چهار ماه خرداد، تیر، مرداد و شهریور نقشه شاخص پوشش گیاهی تفاضلی بهنجار شده^۱ با دقت مکانی ۱۰ متر تهیه شد. داده‌های رقومی ارتفاع^۲ به‌دست آمده از سنجنده راداری ماهواره آلوِس ژاپن با دقت مکانی ۱۲/۵ متر برای تهیه نقشه‌های آب‌زمین‌ریخت‌شناختی با ۱۷ متغیر مستقل ریخت‌سنجی شامل شاخص‌های انحنای کلی^۳، انحنای دامنه یا طولی^۴، شاخص انحنای نیم‌رخ^۵، شاخص تحدب^۶، شاخص طبقه‌بندی انحنای^۷، شاخص فاصله عمودی از شبکه آبراهه^۸، مساحت آبخیز^۹، شاخص توان آبراهه^{۱۰}، فاکتور طول – شیب آبراهه^{۱۱}، شاخص رطوبت

به منظور تهیه و آماده‌سازی نقشه‌های عامل‌های مؤثر و نقشه پراکنش رخداد فرسایش آب‌کندی از نقشه‌های موضوعی پایه و تصویرهای ماهواره‌ای منطقه مطالعه شده به این ترتیب استفاده شد. از نقشه زمین‌شناسی (مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) سازمان زمین‌شناسی کشور برای تهیه نقشه عامل مؤثر واحدهای سنگی یا سنگ‌شناسی، از نقشه کاربری زمین‌ها (مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰) طرح سیمای فرسایش پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری برای تهیه نقشه کاربری زمین‌ها (مقیاس ۱:۱۰۰۰۰)، از نقشه خاک‌شناسی مؤسسه خاک و آب کشور برای تهیه نقشه نوع خاک، از نقشه اقلیمی دوما رتن برای تهیه نقشه نوع اقلیم و از نقشه خطوط هم‌باران به‌دست آمده از تحلیل آماری داده‌های درازمدت بارش ایستگاه‌های هواشناسی شهر ایلام، ایوان و

- 1 -normalized difference vegetation index-(NDVI)
- 2 -Digital Elevation Model-(DEM)
- 3 -General curvature
- 4 -Plan curvature
- 5 -Profile curvature
- 6 -Convergence index
- 7 -Curvature classification index
- 8 -Vertical distance to channel network index
- 9 -catchment area
- 10 -Stream power Index
- 11 -Slope-Length

بیزین (محتشمی برزادران ۲۰۱۹) را می‌توان به شکل رابطه ۱ در نظر گرفت.

$$P(A|B) = (P(B|A) \times P(A)) / P(B) \quad (1)$$

$P(A)$: احتمال رخداد پیشامد A ، $P(B)$: احتمال رخداد پیشامد B ، $P(B|A)$: احتمال رخداد پیشامد B به شرطی که پیشامد A رخ داده باشد و $P(A|B)$: احتمال رخداد پیشامد A به شرطی که پیشامد B رخ داده باشد.

از این روش زمانی که داده‌های کافی به منظور برآورد اهمیت نسبی موضوعات مستدل با روش میانگین‌های آماری مد نظر باشد، استفاده می‌شود.

روش وزن شاهد، روابط مکانی میان عوارض و نقشه‌های موضوعی مؤثر در رخداد آبکنند را ترکیب می‌کند. برای هر نقشه موضوعی، وزن برای هر رده (واحد) محاسبه می‌شود و بر این اساس نقشه وزنی و سپس با جمع جبری همه نقشه‌های وزنی، نقشه حساسیت رخداد آبکنند تهیه می‌شود. ترکیب احتمالات شرطی به وسیله W_i و $-W_i$ به شکل رابطه‌های ۲ و ۳ تعریف می‌شود.

$$W_i^+ = \text{Log}_e [P(B_i | S) / P(B_i | \bar{S})] \quad (2)$$

$$W_i^- = \text{Log}_e [P(\bar{B}_i | S) / P(\bar{B}_i | \bar{S})] \quad (3)$$

W_i و $-W_i$ به ترتیب وزن مثبت و منفی، S : احتمال ثانویه رخداد آبکنند، B_i : بود یا نبود رخداد آبکنند در یک پیکسل از نقشه عامل است. به طور کلی $[P(B_i | S) / P(B_i | \bar{S})]$ را نرخ کیفیت (LS) و $[P(\bar{B}_i | S) / P(\bar{B}_i | \bar{S})]$ را نرخ ضرورت (LN) می‌نامند. در این پژوهش، به منظور درک هر چه بهتر رابطه‌های نامبرده و آسانی کار، به ویژه در محیط GIS، مدل بر پایه جدول ۲ و با استفاده از رابطه‌های ۴ و ۵ ارائه شد.

$$W_i^+ = \text{Log}_e [(N_{pix1} / (N_{pix1} + N_{pix2})) / (N_{pix3} / (N_{pix3} + N_{pix4}))] \quad (4)$$

$$W_i^- = \text{Log}_e [(N_{pix2} / (N_{pix1} + N_{pix2})) / (N_{pix4} / (N_{pix3} + N_{pix4}))] \quad (5)$$

پستی‌بلندی^{۱۲}، بافت سطحی زمین^{۱۳}، ارتفاع^{۱۴}، درجه شیب^{۱۵} (t)، جهت شیب^{۱۶} و شاخص تحلیل سایه و روشن^{۱۷}، تراکم زه‌کشی^{۱۸} و فاصله از شبکه زه‌کشی^{۱۹} استفاده شد. باید توجه داشت که نقشه‌های نامبرده موجود در مقیاس‌های گوناگون به عنوان مبنای اطلاعات اولیه برای شناخت منطقه، استفاده شدند. سپس بر اساس داده‌های تصویرهای ماهواره‌ای سنتینل ۲ با دقت مکانی ۱۰ متر مقیاس داده‌ها در حد مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تدقیق و یکسان شد. به بیان دیگر داده‌های مکانی که در مقیاس مبنای کوچکتر (۱:۲۵۰۰۰۰ مثلاً کاربری زمین‌ها) بودند با داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۲ تا مقیاس بزرگتر (۱:۱۰۰۰۰۰) تدقیق شدند. به منظور تدقیق نقشه‌های عامل‌های مؤثر، شناسایی، تکمیل و تعیین محدوده‌های رخداد فرسایش آبکندی از تصویرهای گوگل ارث استفاده شد. سپس، برای آماده‌سازی و ورود داده‌های مکانی برای اجرای مدل‌ها، کلیه نقشه‌های لازم شامل نقشه‌های عامل مؤثر در محیط ArcGIS 0.8 به شکل رستری با اندازه سلولی مشابه و یکسان ۲۵ متر، دوباره نمونه‌برداری شد. برای ایجاد و مدیریت پایگاه داده‌های مکانی عامل‌های مؤثر، تحلیل و اجرای مدل‌ها و نقشه‌های خروجی، تهیه لایه‌های داده‌های آب‌زمین ریخت‌شناختی از نرم‌افزار SAGGIS4.9 استفاده شد. همچنین، برای پردازش تصویرهای ماهواره‌ای سنتینل ۲، از ENVI5.3 و برای مدیریت و محاسبات مدل‌های وزن شاهد^{۲۰}، دمپستر-شایفر^{۲۱} و پایگاه توصیفی لایه‌های داده‌های از EXCEL2019 استفاده شد. سپس، برای ویژگی عملگر گیرنده (ROC) از نرم‌افزار SPSS26 استفاده شد.

مدل وزن شاهد

در سال‌های گذشته، بسیاری از پژوهش‌گران از روش‌های تجربی که کم و بیش بر پایه نظریه احتمال وابسته است؛ برای تهیه نقشه حساسیت رخداد آبکنند استفاده کرده‌اند. در این چارچوب، احتمال وابسته، اندازه‌گیری درست یا اشتباه بودن یک فرضیه با توجه به شاهدهای موجود است. شبکه‌های بیزین به نام شبکه‌های تصمیم، شبکه‌های تصادفی و منحنی‌های تأثیر نیز شناخته می‌شوند. نظریه

12 -Topographic wetness Index

13 -Surface texture

14 -Altitude

15 -Slope gradien

16 -Slope aspect

17 - Analytical hillshading

18 -Drainage density

19 -Distance to drainage

20 -Weight of Evidence

21 -Dempster Shaffer

کل یک نقشه) - (مساحت کل رخداد آبکند یک نقشه) - (مساحت یک رده) + (مساحت رخداد آبکند در یک رده) است. حالت‌های گوناگون ظرفیت ایجاد رخداد آبکند در جدول ۱ آورده شده است.

Npix1: مساحت رخداد آبکند در یک رده، Npix2: (مساحت کل رخداد آبکند در یک نقشه) - (مساحت رخداد آبکند در یک رده)، Npix3: (مساحت یک رده) - (مساحت رخداد آبکند در یک رده)، Npix4: (مساحت

جدول ۱- حالت‌های مختلف ظرفیت ایجاد رخداد آبکند.

Table 1- Different gully event capacity states.

Factors causing a gully event		
Gully incident	attendance	Absence
attendance	N _{pix1}	N _{pix2}
Absence	N _{pix3}	N _{pix4}

احتمال $\lambda(T_p)E_{ij}$ گزاره هدف مثبت را پشتیبانی می‌کند و به‌شکل رابطه ۸ تعریف می‌شود.

(۸)

$$((\lambda(T_p)E_{ij} = ((N(L \cap E_{ij})) / (N(L))) / ((N(E_{ij}) - N(L \cap E_{ij})) / (N(A) - N(L)))$$

$N(L \cap E_{ij})$: تعداد پیکسل‌های رخداد آبکند در هر رده E_{ij} ، $N(L)$: تعداد کل پیکسل‌های آبکند رخ داده در منطقه مطالعه شده، $N(E_{ij})$: تعداد پیکسل‌ها در هر رده E_{ij} و $N(A)$: تعداد کل پیکسل‌ها در منطقه مطالعه شده است.

صورت و مخرج کسر رابطه ۸ به‌ترتیب نسبت به رخداد آبکند رخ داده و نسبت مناطق بدون رخداد آبکند در طبقه معین E_{ij} است. در مدل دمپستر-شیفر، وزن مثبت، معمولاً با لگاریتم طبیعی نسبت احتمال به‌شکل رابطه ۹ تعریف می‌شود.

$$((T_p^-)E_{ij} = ((N(L) - N(L \cap E_{ij})) / (N(L))) /$$

(۹)

$$((N(A) - N(L) - (N(E_{ij}) - N(L \cap E_{ij}))) / (N(A) - N(L)))$$

نسبت احتمال برای پشتیبانی گزاره هدف مخالف به‌شکل رابطه ۱۰ تعریف می‌شود.

(۱۰)

$$m(T_p)E_{ij} = (\lambda(T_p)E_{ij} - \lambda(T_p^-)E_{ij}) / \sum (\lambda(T_p)E_{ij} - \lambda(T_p^-)E_{ij})$$

صورت کسر مبین نسبت رخداد آبکندهایی است که در طبقه معین E_{ij} رخ نداده‌اند. مخرج کسر، بیانگر نسبت مناطق بدون رخداد آبکند در خارج طبقه‌های دیگر E_{ij} است. وزن منفی در مدل دمپستر-شیفر با لگاریتم طبیعی نسبت احتمال و به‌شکل رابطه ۱۱ محاسبه شد.

(۱۱)

$$m(T_p^-)E_{ij} = (\lambda(T_p^-)E_{ij} - \lambda(T_p)E_{ij}) /$$

$$\sum (\lambda(T_p^-)E_{ij} - \lambda(T_p)E_{ij})$$

به‌طور کلی اندازه دامنه نسبت احتمال از صفر تا بی‌نهایت متغیر است. بنابراین، گام استانداردسازی به توابع جرم از دو تابع نسبت احتمال نیازمند است. نسبت‌های احتمال بر مجموع اندازه‌ها نسبت احتمال ویژگی‌های تمام رده‌ها در شاهد معین E_i تقسیم می‌شود. باتوجه به چهارچوب

سرانجام وزن نهایی بر پایه رابطه‌های ۶ و ۷ برای هر عامل به‌منظور پهنه‌بندی حساسیت رخداد آبکند استفاده شد.

(۶)

$$W_{final} = C / S_C$$

(۷)

$$C = [(W^+) + (W^-)]$$

C: برآیند وزن‌های مثبت و منفی، W_{final} : وزن نهایی استاندارد شده و S_C : انحراف معیار برآیند وزن‌های شاهد مثبت و منفی است که برابر با جذر واریانس هر یک از وزن‌های مثبت و منفی است.

مدل دمپستر-شیفر

با مدل دمپستر-شیفر می‌توان نبودن قطعیت اندازه احتمال پیشامدها را مدل‌سازی کرد و پس از آن به‌عنوان نظریه شاهدها به‌عنوان ساختاری برای نمایش اطلاعات ناکامل و استدلال نبودن قطعیت، فرمول‌بندی کرد. مدل دمپستر-شیفر به‌عنوان نظریه تابع باور شناخته شده است که تعمیمی از نظریه بیزین است که مبتنی بر احتمالات می‌باشد. در این پژوهش از مدل دمپستر-شیفر در تحلیل حساسیت رخداد فرسایش آبکندهی استفاده شد که ساختار آن به‌شکل رابطه ۷ تعریف است.

$$m: 2^{\Theta} = \{\theta, T_p, \overline{T_p}, \emptyset\} \quad \text{با} \quad \Theta = \{T_p, \overline{T_p}\} \quad (۷)$$

T_p : گزاره هدف و مبین پیکسل‌ها یا سلول‌های متأثر از رخداد آبکند محتمل، متضاد گزاره هدف مبین پیکسل‌ها یا سلول‌هایی است که تحت تأثیر رخداد آبکند محتمل نیستند، می‌باشد. اگر لایه‌های داده‌های مکانی چندگانه (L) در یک منطقه که حساسیت رخداد آبکند آن قابل بررسی است، موجود باشد، هر لایه داده مکانی به‌عنوان شاهد E_i ($i=1, 2, \dots, L$) برای گزاره هدف T_p در نظر گرفته می‌شود. داده معلوم E_{ij} ، که ویژگی رده زام شاهد E_i و توابع توزیع فراوانی گزاره‌های مثبت و مخالف می‌باشند، نسبت

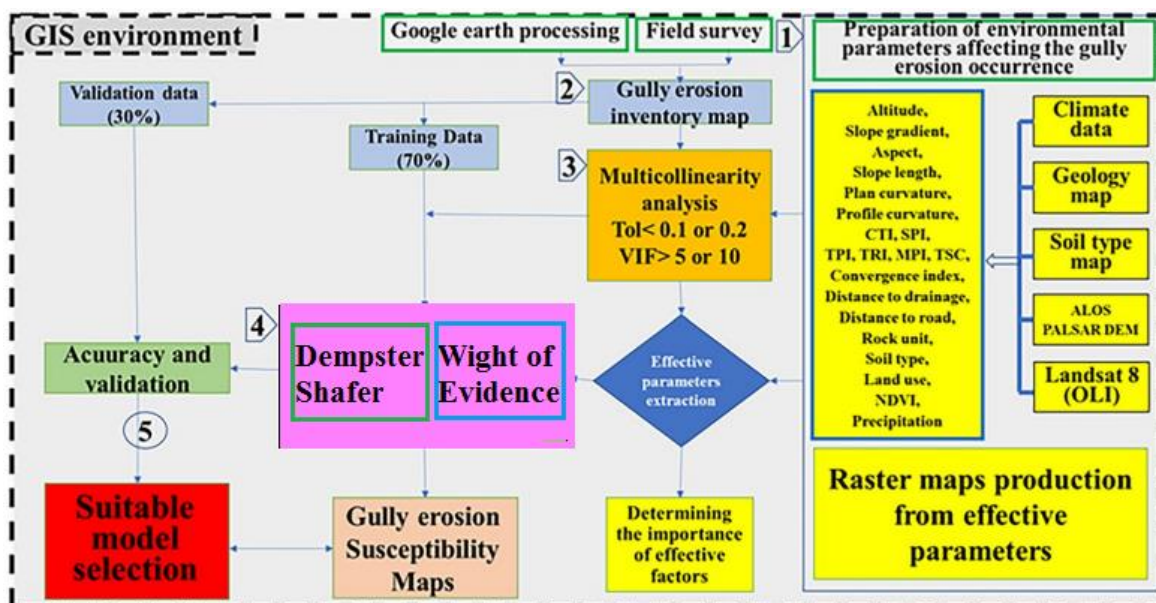
تصادفی به دو دسته آموزشی یا واسنجی (۷۰٪) و دسته آزمایشی یا پیش‌بینی (۳۰٪) تقسیم شدند. در گام دوم نقشه‌های ۲۲ عامل مؤثر (متغیرهای مستقل) تهیه و آماده‌سازی شد. در گام سوم عامل‌های مؤثر با استفاده از آزمون هم‌راستایی میان عامل‌های مؤثر و رخداد آبکندها انتخاب شدند. در گام چهارم مدل‌های وزن شاهد و دمپستر-شیفر اجرا شد و نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شد. در گام پنجم اعتبارسنجی، ارزیابی، مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت به‌دست آمده از مدل‌های نامبرده در دو مرحله واسنجی و پیش‌بینی انجام شد. در گام ششم آستانه‌ها و اهمیت عامل‌های مؤثر بر اساس بهترین مدل تعیین شد. در گام هفتم نقشه پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت به رخداد فرسایش آبکند تهیه شد. کارنامی روش پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.

تشخیص تحلیل‌های حساسیت رخداد آبکند، تابع باور $m(T_P)_{Eij}$ برای پشتیبانی گزاره هدف مثبت $(T_P)_{Eij}$ به‌طور مستقیم از تابع جرم بازیابی می‌شود. همچنین، تابع نابوری $m(\bar{T}_P)_{Eij}$ برای پشتیبانی گزاره هدف مخالف $(\bar{T}_P)_{Eij}$ از تابع جرم بازیابی می‌شود. تابع مقبولیت $m(\theta)$ به‌دست آمده از تفاضل توابع باور و نابوری از اندازه یک، به‌وسیله رابطه ۱۲ محاسبه شد.

(۱۲)

$$m(\theta) = 1 - m(T_P)_{Eij} - m(\bar{T}_P)_{Eij}$$

در این مدل طبقه‌هایی که وزن تابع باور بیشتر و نابوری کمتری دارند، حساسیت بیشتری نسبت به رخداد آبکند دارند. این پژوهش، در هفت گام اصلی انجام شد. در گام اول منطقه پژوهشی انتخاب شد و نقشه پراکنش رخداد آبکندها (متغیر وابسته) تهیه شد و داده‌ها به‌شکل



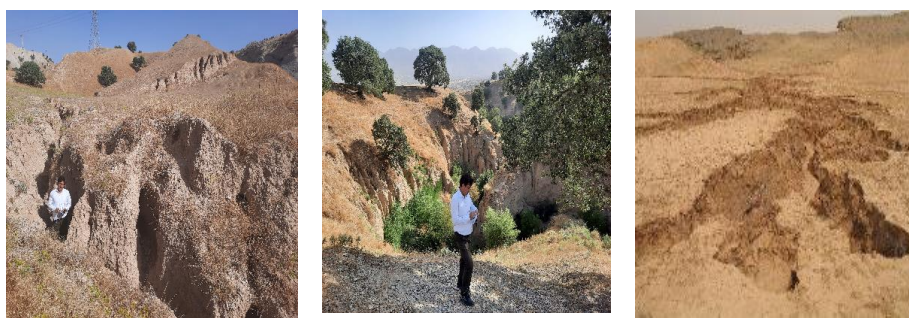
شکل ۲- کارنامی روش پژوهش.

Figure 2- The methodology flowchart.

بودند و نقشه پراکنش آبکندها نسبت به مرز آبخیز در شکل ۳ نشان داده شده است. طول بلندترین آبکند ۱۷۴۲ متر و از نوع پنجه‌ای بود، و طول کوتاه‌ترین آبکند ۲۸ متر بود. تصویرهایی از آبکندهای طبیعی منطقه در شکل ۳ نشان داده شده است. پراکنش آبکند و لایه آبراهه روی لایه سایه روشن در شکل ۴ نشان داده شده است. آبکندهای پیرامون شهر چوار روی تصویر گوگل‌ارث که در آبخیز مطالعه شده بود، در شکل ۵ نشان داده شده است.

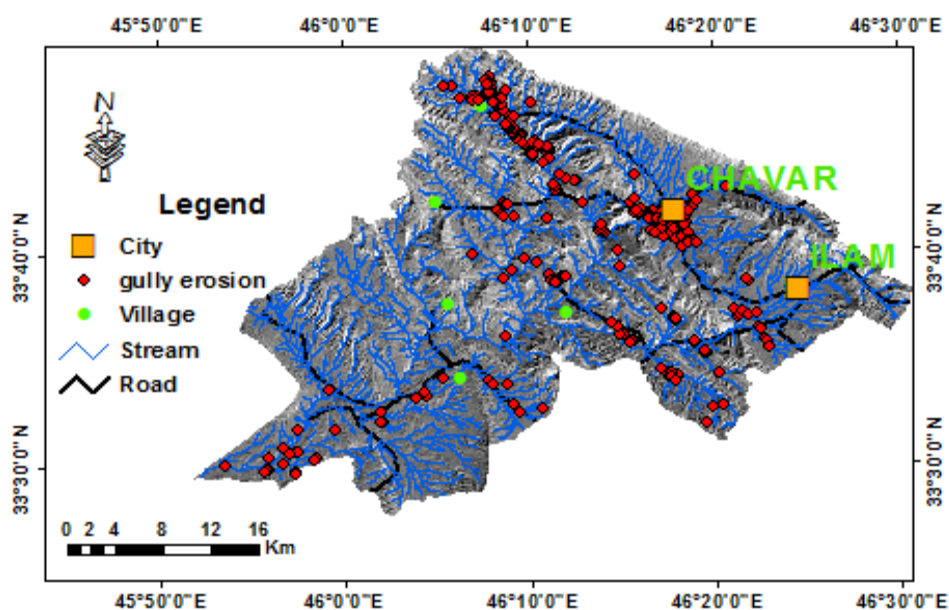
نتایج و بحث

در این پژوهش با تدقیق گوگل‌ارث پس از بررسی‌های میدانی منطقه، ۳۳۱ آبکند شناسایی و بررسی شد. انواع آبکندهای مشاهده‌شده در این منطقه شامل فرم‌های، پنجه‌ای، پیازی، خطی و جبهه‌ای بودند که به‌ترتیب تعداد ۱۶۶ آبکند پنجه‌ای (۵۰/۱۵٪)، تعداد ۷۸ آبکند خطی (۲۳/۵۶٪)، تعداد ۵۳ آبکند پیازی (۱۶/۰۱٪) و تعداد ۳۴ آبکند جبهه‌ای (۱۰/۲۷٪) انتخاب شد. بیشتر آبکندهای منطقه مطالعه‌شده از نوع آبکندهای پنجه‌ای



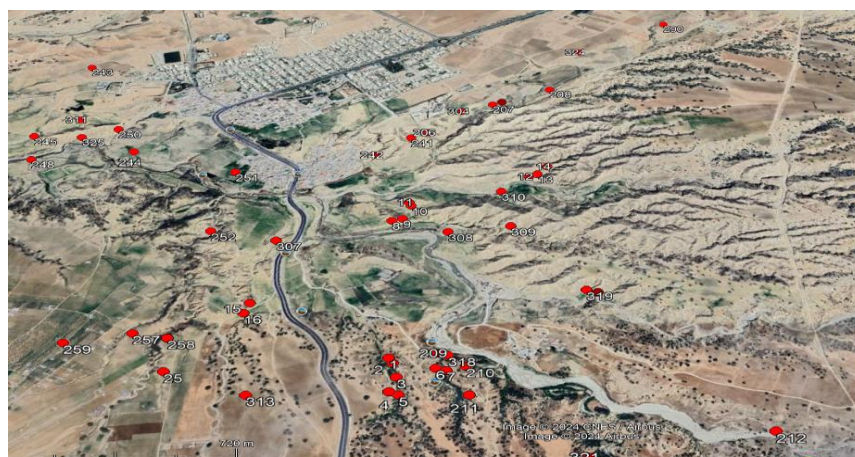
شکل ۳- نمونه‌ای از اشکال فرسایش آب‌کندی آبخیز ایلام.

Figure 3- Examples of forms of gully erosion in the Ilam Watershed.



شکل ۴- نقشه پراکنش فرسایش آب‌کندی آبخیز ایلام.

Figure 4- Distribution map of gully erosion in Ilam Watershed.



شکل ۵- آب‌کند پیرامون شهر چوار استان ایلام در تصویر گوگل ارث.

Figure 5- The gully around the city of Chavar, Ilam Province, in the Google Earth image.

نتایج بررسی هم‌خطی میان عامل‌های مؤثر (متغیرهای مستقل) بر فرسایش آبکندی

هم‌پوشانی داده‌ها یا چندراستایی عامل‌های مؤثر (متغیرهای مستقل) موجب ایجاد خطای بسیار زیاد در نتایج نهایی داده‌کاوی، مدل‌سازی، پهنه‌بندی و پیش‌بینی حساسیت رخداد فرسایش آبکندی می‌شود. در این پژوهش، به‌منظور بررسی و تحلیل هم‌پوشانی عامل‌های مستقل از تحلیل استقلال داده‌ها استفاده شد. در این راستا، با تحلیل چندراستایی^{۲۲} می‌توان همبستگی میان متغیرهای مستقل را برآورد کرد و از دو شاخص مهم به نام‌های ضریب تحمل^{۲۳} (TOL) و عامل انباشتگی پراکندگی^{۲۴} (VIF) برای تحلیل چندراستایی استفاده کرد. رابطه میان دو اندازه VIF و TOL عکس بود. تاکنون، هیچ قانون مشخصی برای تعیین آستانه این دو

اندازه VIF و TOL در تحلیل و برآورد چندراستایی عامل‌های تأثیرگذار بر رخداد فرسایش آبکندی وجود نداشته است، اما بر پایه نتایج پژوهش‌های انجام‌شده، اگر اندازه VIF کم‌تر از ۵ (محتاطانه) یا ۱۰ (سهل‌انگارانه) باشد و TOL بزرگ‌تر از ۰/۱ (سهل‌انگارانه) یا ۰/۲ (محتاطانه) باشد در آن شرایط مشکل هم‌خطی یا هم‌پوشانی داده‌ها وجود نخواهد داشت. به بیان دیگر میان داده‌ها یا متغیرهای مستقل هیچ همبستگی یا هم‌خطی وجود ندارد.

نتایج تحلیل هم‌خطی میان متغیرها در جدول ۲ نشان داده شده است. بر اساس نتایج تحلیل هم‌خطی، ضریب تحمل سنجه‌ها بیشتر از ۰/۱ بود و عامل تورم پراکنش آن‌ها به جز دو شاخص توان آبراهه و رطوبت پستی‌بلندی، کمتر از ۱۰ بود. از این‌رو، با ۲۱ شاخص مدل‌سازی انجام شد.

جدول ۲ - تحلیل هم‌خطی عامل‌های مؤثر بر رخداد فرسایش آبکندی.

Table 2 - Collinear analysis of factors affecting the occurrence of gully erosion.

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
Constant	-0.309	0.268		-1.157	0.248		
hillshad	0.036	0.021	0.058	1.741	0.082	0.862	1.16
Slope aspect	0.016	0.007	0.092	2.312	0.021	0.592	1.69
convergence	0.134	0.051	0.141	2.601	0.01	0.318	3.141
curvature	-0.075	0.028	-0.101	-2.659	0.008	0.654	1.528
Curvature classification	-0.317	0.009	0	-0.001	0.999	0.38	2.63
Distance to drainage	0.105	0.039	0.121	2.701	0.007	0.466	2.144
Climatology	-0.029	0.019	-0.058	-1.488	0.137	0.619	1.615
Drainage density	0.158	0.021	0.315	7.659	0	0.557	1.794
Altitude	-0.085	0.041	-0.1	-2.068	0.039	0.399	2.508
Landuse	-0.07	0.024	-0.115	-2.878	0.004	0.59	1.694
Litology	-0.029	0.014	-0.083	-2.009	0.045	0.547	1.827
Slope-Length	-0.033	0.032	-0.059	-1.036	0.301	0.292	3.428
NDVI	0.139	0.031	0.186	4.572	0	0.57	1.755
Plan Crvature	-0.037	0.041	-0.039	-0.892	0.372	0.487	2.053
Profile Crvature	0.061	0.036	0.068	1.692	0.091	0.586	1.708
Rian	0.046	0.024	0.099	1.924	0.055	0.358	2.795
Slope gradient	-0.024	0.034	-0.045	-0.707	0.48	0.229	4.36
Soil type	0.004	0.015	0.01	0.265	0.791	0.636	1.572
Stream power	-0.024	0.036	-0.057	-0.677	0.498	0.131	7.606
Surface texture	-0.052	0.021	-0.1	-2.509	0.012	0.592	1.689
catchment area	0.02	0.036	0.02	0.553	0.58	0.742	1.348
Topographic wetness	0.057	0.042	0.116	1.371	0.171	0.131	7.644
Vertical distance to channel network	0.019	0.023	0.035	0.811	0.418	0.505	1.981

a Dependent Variable: Gully

نتایج بررسی عامل‌های مؤثر بر فرسایش آبکندی

نتایج بررسی عامل‌های مؤثر بر رخداد فرسایش آبکندی آبخیز نسبت به فراوانی رخداد فرسایش آبکندی که در جدول ۴ نشان داده شده است. نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی در هر پهنه یا طبقه عامل، ساده‌ترین و

مناسب‌ترین شاخص برای مقایسه و بررسی طبقه‌های هر یک از عامل‌های مؤثر در رخداد فرسایش آبکندی است. فرسایش‌های آبکندی منطقه مطالعه شده اکثراً در مناطق پست مشاهده شدند. دلیل این یافته می‌تواند تجمع جریان در مناطق پست پایین دست یک آبخیز باشد (انتظاری و

22 - Multicollinearity

23 - Tolerance (TOL)

24 - Variance Inflation Factor (VIF)

همکاران ۲۰۱۴). نتایج بررسی نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های بلندی نشان داد که در پنج طبقه بلندی (> ۵۰۰ ، $۱۵۰۰-۵۰۰$ ، $۲۵۰۰-۱۵۰۰$ ، $۳۰۰۰-۲۵۰۰$ متر) با افزایش بلندی تا ۲۵۰۰ متر اندازه نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی افزایش یافت و این رابطه مستقیم بود، اما از بلندی ۲۵۰۰ متر نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی کاهش یافت و این رابطه عکس بود. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و نقشه شاخص سایه روشن در ۴ طبقه نشان داد که اندازه شاخص سایه روشن ($۰/۰۵$ تا $۱/۹۱$) به اثر ترکیب بلندی با ریخت‌سنجی سطح زمین بستگی دارد و با نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی رابطه عکس داشت. نتایج نشان داد که رابطه میان بلندی و مناطق مستعد به فرسایش آبکندی (از نظر کمی) عکس بود. این یافته‌ها با نتایج دیگر پژوهش‌ها (مرکر و همکاران ۲۰۱۵؛ رنگزن و همکاران ۲۰۲۲) هم‌راستا است. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و نقشه درجه شیب (درصد) در ۵ طبقه کم‌تر از ۵٪ (دشت‌ها)، ۵ تا ۱۲٪ (دشت‌سرها)، ۱۲ تا ۲۵٪ (تپه‌ها)، ۲۵ تا ۴۰٪ (کوهستانی کم شیب) و بیش‌تر از ۴۰٪ (کوهستانی با شیب زیاد) نشان داد که رابطه میان نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی با افزایش شیب عکس بود. به بیان دیگر با افزایش شیب، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی کاهش یافت. درجه شیب یکی از اصلی‌ترین عامل‌های محیطی در فرایند شکل‌گیری فرسایش آبکندی است (کنسکنتی و همکاران ۲۰۱۴؛ رحمتی و همکاران ۲۰۱۷). در پژوهشی لانا و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که عامل شیب تأثیر زیادی بر خصوصیات آبی جریان داشت و به دنبال آن، اندازه فرسایش خاک نیز تغییر یافت و فرسایش آبکندی رخ داد. در این پژوهش بر اساس نتایج نسبت فراوانی و وزن‌های به‌دست آمده از هر دو مدل (وزن شاهد، دمپستر-شیفر) مشخص شد که در رخساره زمین‌ریخت‌شناختی دشت‌سر تا قبل از رخساره کوهستان با افزایش شیب (تا ۱۵٪) اندازه رخداد فرسایش آبکندی افزایش یافت. از آنجایی که شکل‌گیری فرسایش آبکندی وابستگی زیادی به شرایط بالادست دارد، هنگامی که طول دامنه زیاد باشد، ظرفیت رخداد فرسایش آبکندی به واسطه تجمع جریان‌های سطحی، افزایش خواهد یافت. از این‌رو، عامل طول دامنه در برخی از پیش‌بینی‌های استعداد فرسایش خاک به‌عنوان متغیر پیش‌بینی‌کننده استفاده شده است (کنسکنتی و همکاران ۲۰۱۴؛ روی و همکاران ۲۰۱۹). نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی

عامل طول شیب (متر) در ۵ طبقه (صفر تا ۲۳۵ متر) نشان داد که رابطه میان اندازه طول شیب با نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی رابطه عکس بود. با افزایش طول شیب نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی کاهش یافت. این یافته می‌تواند به دلیل دیگر سنج‌های ریخت‌سنجی در دامنه‌های گسترده مانند استقرار پوشش گیاهی، جنس سازند و ... باشد. در پژوهشی، صوفی و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که جهت شیب نقش به‌سزایی در نرخ فرسایش خاک و تحولات زمین‌ریخت‌شناسی سطح زمین دارد. عامل جهت شیب در پیش‌بینی استعداد رخداد فرسایش آبکندی نقش مهمی دارد و در پژوهش‌های پیشین استفاده شده است (کنسکنتی و همکاران ۲۰۱۴، سان و همکاران ۲۰۲۲). بر اساس نتایج این پژوهش، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و نقشه جهت یا درجه شیب در ۹ طبقه صاف، شمالی، شمال‌شرقی، شرقی، جنوب‌شرقی، جنوبی، جنوب‌غربی، غرب و شمال‌غربی ارائه شد. بیشترین اندازه نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی به ترتیب در جهت‌های شیب شمال، شمال‌غرب و شمال‌شرق مشاهده شد. دلیل این یافته می‌تواند رطوبت و ژرفای بیشتر خاک در دامنه‌های شمالی باشد. همچنین، کمترین اندازه نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی در جهت‌های شیب جنوب، صاف و جنوب‌شرق بود. برای سطح زمین پنج نوع انحنا شامل انحنای کلی، انحنای مقطع و انحنای دامنه یا سطح، هم‌گرایی سطح زمین و طبقه‌بندی انحنا در نظر گرفته شد. هر یک از این متغیرها حاوی داده‌های متمایزی از وضعیت هم‌گرایی عمودی و افقی دامنه‌ها بودند و تأثیر زیادی بر شرایط آبی جریان سطحی، زیرسطحی و در نتیجه بر نرخ فرسایش خاک داشتند. عامل‌های انحنا در پیش‌بینی استعداد فرسایش آبکندی غالباً استفاده شده اند (شهریور و همکاران ۲۰۱۶، روی و همکاران ۲۰۱۹). نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های شاخص انحنا در سه طبقه هم‌گرا یا مقعر^{۲۵} ($۱۸/۲۴-۰/۱$)، صاف یا مسطح^{۲۶} ($۰/۱-۰/۱$)، واگرا یا محدب^{۲۷} ($۰/۱$ تا $۲۰/۶۴$) ارائه شد. نتایج بررسی اندازه شاخص انحنا کلی با اندازه نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نشان داد که ابتدا آبکند افزایش یافت (هم‌گرا به صاف) و سپس کاهش یافت (صاف به واگرا). به‌طور کلی نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی طبقه هم‌گرا در مقایسه با طبقه واگرا بیش‌تر بود. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های شاخص انحنا دامنه یا طولی در سه طبقه هم‌گرا یا مقعر

25- Concave

26- Flat

27- Convex

(۹/۷۴ - تا ۰/۱-)، صاف یا مسطح (۰/۱ - تا ۰/۱)، واگرا یا محدب (۰/۱ تا ۱۰/۲۳) ارائه شد. نتایج بررسی اندازه شاخص انحنا دامنه یا طولی با اندازه نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نشان داد که ابتدا آبکند افزایش یافت (هم‌گرا به صاف) و سپس کاهش یافت (صاف به واگرا). نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و شاخص طبقه‌بندی انحنا در هشت طبقه از ۱ تا ۸ ارائه شد. به‌طور کلی رابطه میان نسبت فراوانی و طبقه‌های شاخص طبقه‌بندی انحنا عکس بود. به بیان دیگر با افزایش شاخص طبقه‌بندی انحنا، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی کاهش یافت.

نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های شاخص هم‌گرایی در ۴ طبقه (۱۷- تا ۱۷/۵) ارائه شد. به‌طور کلی رابطه میان نسبت فراوانی و طبقه‌های شاخص هم‌گرایی عکس بود. به بیان دیگر با افزایش اندازه شاخص هم‌گرایی، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی کاهش یافت. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های شاخص انحنا نیم‌رخ یا عرضی مناطق مطالعه‌شده در سه طبقه هم‌گرا یا مقعر (۱۱/۸۶ تا ۰/۱)، صاف یا مسطح (۰/۱ تا ۰/۱-)، واگرا یا محدب (۰/۱ - تا ۱۹/۳-) ارائه شد. نتایج بررسی اندازه شاخص انحنا نیم‌رخ یا عرضی با اندازه نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نشان داد که ابتدا آبکند افزایش یافت (واگرا به صاف) و سپس کاهش یافت (صاف به هم‌گرا). در آبخیز ایلام نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی طبقه هم‌گرا در مقایسه با طبقه واگرا بیش‌تر بود. به‌طور کلی اندازه‌های منفی انحنا که بیانگر هم‌گرایی سطح است به دلیل تمرکز جریان و تأثیر بیشتر بر فرسایش در مقایسه با اندازه‌های مثبت انحنا یا سطوح صاف، اندازه‌های بیشتری از نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی را کسب کردند. بر اساس نتایج این پژوهش و با توجه به نقشه شاخص هم‌گرایی و منحنی پاسخ این شاخص، بیش‌تر آبکندها در مناطق مقعر تشکیل شده‌اند. مناطق پست که حالت مقعر دارند، نقش چاله‌هایی را دارند که باعث به دام افتادگی رواناب می‌شوند و شرایط لازم برای انحلال را فراهم می‌آورد. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های انگلیسی و همکاران ۲۰۱۶، رحمتی و همکاران ۲۰۱۷ هم‌راستا است. پیرامون آبراهه‌ها و رودها به دلیل تمرکز جریان و جریان آب‌های سطحی عموماً شرایط مناسبی برای شکل‌گیری فرسایش آبکندی است (تادسل و همکاران ۲۰۲۳). از این‌رو، فاصلی افقی و عمودی از جریان به عنوان یکی از متغیرهای محیطی در پیش‌بینی و تحلیل مکانی استعداد فرسایش آبکندی به کار گرفته شده است (کنسکنتی و همکاران ۲۰۱۴، رحمتی و همکاران ۲۰۱۶).

هیئتوری و همکاران ۲۰۲۲. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های شاخص فاصله عمودی تا شبکه آبراهه در ۴ طبقه (۰-۸۵ متر) ارائه شد. نتایج بررسی اندازه شاخص فاصله عمودی تا شبکه آبراهه با نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نشان داد که ابتدا آبکند افزایش یافت (۰-۱۵ متر) و سپس کاهش یافت (<۱۵ متر). بر اساس این نتایج در آبخیز مطالعه‌شده با افزایش فاصله افقی و عمودی از آبراهه‌ها نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نیز کاهش یافت. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های فاصله از آبراهه بر حسب متر در ۴ طبقه (۰ تا بیش‌تر از ۵۰۰ متر) ارائه شد. رابطه میان اندازه فاصله از آبراهه با نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی عکس بود. به بیان دیگر با افزایش فاصله از آبراهه، اندازه نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی کاهش یافت.

سطح زهکشی آبخیز هرچه بیشتر باشد تمرکز جریان در قسمت‌های پایین‌دست نیز افزایش خواهد یافت و رخداد فرسایش آبکندی نیز افزایش خواهد یافت (شیرانی ۲۰۱۸). نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های شاخص سطح زهکشی آبخیز در ۴ طبقه (۵۵- تا ۰/۲۱ کیلومتر) ارائه شد. به‌طور کلی رابطه میان نسبت فراوانی و طبقه‌های شاخص سطح زهکشی آبخیز مطالعه‌شده مستقیم بود. به بیان دیگر با افزایش اندازه شاخص سطح زهکشی آبخیز، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نیز افزایش یافت. این یافته با نتایج پژوهش سعیدیان و همکاران (۲۰۲۳) هم‌خوانی دارد.

بافت سطحی زمین بیانگر زبری سطح زمین است. بافت سطحی زبر بیانگر وجود رسوب‌گذاری متناوب یا سازندهای سست است و در نتیجه در سطح زمین اندازه فرسایش زیاد خواهد بود. بنابراین، در سطوح با زبری زیاد امکان رخداد فرسایش آبکندی بیش‌تر خواهد بود. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی و طبقه‌های شاخص بافت سطحی زمین در ۴ طبقه (۱۲/۲۵- تا ۲۳/۵) ارائه شد. رابطه میان اندازه شاخص بافت سطحی زمین با نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی مستقیم بود. به بیان دیگر با افزایش بافت سطحی زمین، اندازه نسبت فراوانی رخداد فرسایش آبکندی نیز افزایش یافت.

شاخص توان جریان که نشان‌دهنده اندازه انرژی جریان است در پژوهش‌های گوناگون فرسایش و سیل استفاده شده است (لیوزو و همکاران ۲۰۱۹؛ آزادیو و همکاران ۲۰۲۱). انرژی جریان نقش مهمی در شروع فرایند فرسایش آبکندی دارد (شای و همکاران ۲۰۲۰). از این‌رو، شاخص توان جریان در پژوهش‌های پیش‌بینی استعداد فرسایش آبکندی کاربرد فراوانی داشته است

رخداد فرسایش آب‌کندی اندکی کاهشی بود و سپس از اندازه ۱/۸ و بیشتر شاخص نامبرده، این روند افزایشی بود. تراکم زهکشی یکی از معیارهای مهم توصیف رفتار و پاسخ آب‌شناختی آبخیز است. هرچه اندازه تراکم زهکشی در آبخیز بیشتر باشد، ظرفیت تخلیه جریان از آبخیز سریع‌تر خواهد بود. در پژوهشی گایدن و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از تحلیل‌های مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره نشان دادند که در قسمت‌هایی از آبخیز که تراکم زهکشی بیشتر باشد، احتمال فرسایش آب‌کندی و تولید رسوب نیز بیشتر است. بر اساس نتایج پژوهش رحمتی و همکاران (۲۰۱۶)، تراکم زهکشی موجب تجمع بیشتر جریان در یک محدوده از آبخیز است که به‌نوبه خود افزایش احتمال شکل‌گیری فرسایش آب‌کندی در این محدوده‌ها را نیز به‌دنبال خواهد داشت. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آب‌کندی و طبقه‌های تراکم آبراهه در ۵ طبقه (۰-۳۴) برحسب کیلومتر در کیلومتر مربع ارائه شد. رابطه میان نسبت فراوانی آب‌کند و شاخص تراکم آبراهه مستقیم بود. به بیان دیگر با افزایش اندازه تراکم آبراهه، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آب‌کندی نیز افزایش یافت (سلیمانپور و همکاران ۲۰۲۱، تادسل و همکاران ۲۰۲۳، زاگری‌نژاد و همکاران ۲۰۲۳).

سازند زمین‌شناسی یکی از مهم‌ترین سنجه‌های مؤثر در رخداد فرسایش آب‌کندی است. زیرا مقاومت واحدهای سنگی گوناگون و اندازه حساسیت آن‌ها نسبت به انواع فرسایش به‌ویژه فرسایش آبی نیز متفاوت است. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آب‌کندی و نوع واحد سنگی در ۵ گروه بر حسب ویژگی‌های سنگی ارائه شد. بیشترین رخداد فرسایش آب‌کندی به‌ترتیب در گروه‌های دو، چهار، سه، یک و پنج مشاهده شد. گروه‌های سنگی در جدول ۳ نشان‌دهنده شده است.

(داب و همکاران ۲۰۱۴؛ کنسکنتی و روتگینو ۲۰۲۰). در پژوهشی شیت و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از مدل وزن شاهد نشان دادند که رابطه میان شاخص توان جریان و رخداد فرسایش آب‌کندی معنی‌دار بود. تأثیر مستقیم این شاخص در کنش سطح زمین و شکل‌گیری فرسایش آب‌کندی نیز در نتایج پژوهش ملیو و همکاران (۲۰۱۸) نیز گزارش شده است. نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آب‌کندی و طبقه‌های شاخص توان آبراهه در ۵ طبقه (۱۳/۵-۷/۶۹) ارائه شد. رابطه میان اندازه نسبت فراوانی و شاخص توان آبراهه مستقیم بود. به بیان دیگر با افزایش اندازه شاخص توان آبراهه، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آب‌کندی نیز افزایش یافت.

در شاخص رطوبت پستی‌بلندی، با در نظر گرفتن مساحت بالادست هر نقطه، ظرفیت تولید رواناب و جریان به‌شکل غیرمستقیم نشان‌دهنده می‌شود. جانسونزیک و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که با استفاده از شاخص رطوبت پستی‌بلندی می‌توان بسیاری از فرایندهای سطحی و زیرسطحی را در مقیاس چشم‌انداز تفسیر کرد. از شاخص رطوبت پستی‌بلندی می‌توان در پژوهش‌های پیش‌بینی استعداد فرسایش آب‌کندی در مدل‌های داده‌کاوی، آماری و احتمالاتی استفاده کرد (گاین و همکاران ۲۰۱۹؛ ایگو و همکاران ۲۰۲۰). نتایج نسبت فراوانی رخداد فرسایش آب‌کندی و طبقه‌های شاخص رطوبت پستی‌بلندی در ۵ طبقه (۷/۵۲-۱۴/۱۴) ارائه شد. رابطه میان نسبت فراوانی آب‌کند و شاخص رطوبت پستی‌بلندی مستقیم بود. به بیان دیگر با افزایش اندازه شاخص رطوبت پستی‌بلندی، نسبت فراوانی رخداد فرسایش آب‌کندی نیز افزایش یافت. در آبخیز ایلام نتایج بررسی شاخص رطوبت پستی‌بلندی با اندازه نسبت فراوانی رخداد فرسایش آب‌کندی نشان داد که ابتدا از اندازه ۷/۵۲ تا ۱/۸ شاخص نامبرده، روند فراوانی

جدول ۳- گروه سنگی سازندهای زمین‌شناسی بر اساس ویژگی‌های سنگی.

Table 3- rock group of geological formations based on rock characteristics.

group code	percent age of formati	area in hectares	lithology	the type of geological formation
1	7.21	137116	Alternation of marl and sandstone	Aghajari
1	10.84	205891	Marl, eniedrite, gypsum, salt and bitumen streaks	Gach-saran
2	12.63	240751	Shale, sandstone, marl and thin gray interbedded limestone	Gurpi
3	12.02	229065	Alternation of thin-layered limestone and marl	Ilam
1	1.18	22360	Thick layered conglomerate with interlayer of sandstone and marl	Bakhtiari Conglomerate
4	18.41	350767	Green to blue shale and marl	Pabde
1	2.46	46880	Bulk lime with thin lime interlayers	Lehbri
1	13.25	247112	River deposits and new alluviums	Quaternary
5	22.00	419292	Limestone masses	Asmari

پژوهش با افزایش بارش به‌ویژه در مناطق اقلیمی فراخشک، خشک و نیمه‌خشک اندازه رخدادهای فرسایش آبکندی بیشتر بود. نتایج نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی و طبقه‌های بارش در ۴ طبقه (کم‌تر از ۳۰۰ میلی‌متر، ۳۰۰ تا ۳۵۰ میلی‌متر، ۳۵۰ تا ۳۷۰ میلی‌متر و بیشتر از ۳۷۰ میلی‌متر) ارائه شد. رابطه اندازه بارش با نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی مستقیم بود. به بیان دیگر با افزایش بارش نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی نیز افزایش یافت. نتایج نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی و نوع اقلیم در ۳ اقلیم (نیمه‌خشک از جنوب و جنوب‌غرب به نیمه‌مرطوب و مدیترانه‌ای به طرف شمال آبخیز) ارائه شد. بیشترین اندازه نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی به ترتیب در اقلیم مدیترانه‌ای، نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب مشاهده شد.

نتایج تطبیقی عامل‌ها و آستانه فرسایش آبکندی

بیشترین رخدادهای آبکندی در طبقه بلندی کمتر از ۵۰۰ متر تا بلندی ۱۵۰۰ متر با اندازه بارش ۱۰۰ تا ۷۵۰ میلی‌متر، سنگ‌شناسی رسوبات منفصل، شیل و مارن، تراکم آبراهه ۰/۷-۳/۲ کیلومتر در کیلومتر مربع، نوع خاک اینسپتی‌سویل یا لیتیک‌کلسی‌زرپیت، درجه شیب ۰ تا ۱۲/۵٪، با کاربری زمین کشاورزی و باغ، مرتعی و زمین بایر، شاخص بهنجارشده تفاوت پوشش گیاهی ۰/۷۵-۰/۵۰، تحلیل سایه روشن ۰/۵۵-۰/۷۷، شاخص رطوبت پستی‌بلندی ۳/۵-۸/۱۴، شاخص هم‌گرایی ۰/۱- تا ۰/۱، انحنا دانه ۰/۱- تا ۰/۱، وجه شیب ۶۷/۵ و ۲۹۲/۵ درجه، فاصله از آبراهه ۲۵-۲۰۰ متر، فاصله عمودی از شبکه آبراهه ۰-۴۰۰ متر، انحنا ۰/۱- تا ۰/۱، اقلیم فراخشک و نیمه‌خشک، سطح زه‌کشی آبخیز ۰/۱ کیلومتر مربع، انحنا مقطع ۰/۱- تا ۰/۱، طول شیب ۲۰-۲۰۰ متر و بافت سطح زمین ۵/۵-۸/۵ مشاهده شد. خروجی لایه‌ها نشان داد که بیشترین رخدادهای آبکندی از دیدگاه زمین‌شناسی در گروه‌های سنگی ۱ و ۲ مارن‌های فرسایش‌پذیر سازندهای گورپی، پابده، گچساران و آماجاری بودند و از دیدگاه کاربری در کاربری زمین‌های مرتعی، بایر، کشاورزی و باغی بودند که بر روند شکل‌گیری مراکز جمعیتی شهر ایلام، شهرک صنعتی، شهر چوار، کارخانه پتروشیمی، پالایشگاه گاز، سازه‌های حفاری و استخراج نفت، سازه‌های سد و روستاهای توابع دو شهرستان منطبق بود. از این‌رو، می‌توان گفت که تغییرات کاربری یکی از مهم‌ترین عامل‌های تأثیرگذار در تشدید فرسایش آبکندی در آبخیز ایلام است.

تغییر کاربری زمین‌ها از جنگلی یا مرتعی به کاربری کشاورزی و باغ به دلیل تأثیر فعالیت انسانی و جریان‌های مصنوعی آب در سطح زمین و یا جابه‌جایی خاک (شخم زدن)، نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی افزایش یافت. از سوی دیگر، در مناطق با پوشش متراکم جنگلی و مرتعی به دلیل استقرار گیاه و نبودن جریان‌های سطحی، گستردگی رخدادهای فرسایش آبکندی کم بود. تأثیر نوع کاربری زمین‌ها در ایجاد آبکندهای خطی معنی‌دار بود و تأثیر کاربری مرتع در ایجاد این آبکندها بیشتر بود. این یافته به‌وسیله پژوهشگران دیگر نیز گزارش شده است (جعفری‌گرزین و همکاران، ۲۰۲۳). نتایج نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی و کاربری زمین در ۶ گروه ارائه شد. اندازه نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی در انواع کاربری زمین به ترتیب از بیشترین تا کم‌ترین که در جدول ۴ نشان داده شده است. در آبخیز ایلام، رخدادهای فرسایش آبکندی به ترتیب در کاربری کشاورزی و باغ، زمین بایر، جنگل و مرتع فقیر مشاهده شد. نتایج نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی و انواع خاک در ۵ گروه ارائه شد. اندازه فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی در خاک‌هایی با رخنمون سنگی اینسپتی‌سویل کمترین بود و در بدلدنها یا هزاردره‌ها بیش‌ترین بود.

پوشش گیاهی همواره یک نقش محافظتی در مقابل بارندگی و جریان‌های سطحی داشته و موجب کاهش فرسایش خاک می‌شود. نقشه تراکم پوشش گیاهی داده‌های مفیدی در زمینه آسیب‌پذیری و حساسیت زمین‌ها نسبت به فرسایش خاک ارائه داد. یکی از شاخص‌های رایج برای محاسبه تراکم پوشش گیاهی، شاخص بهنجارشده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) است که در پژوهش‌های مدل‌سازی و پیش‌بینی فرسایش آبکندی استفاده شده است (آزادپو و همکاران، ۲۰۲۱؛ سان و همکاران، ۲۰۲۲). نتایج نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی و طبقه‌های شاخص NDVI در ۳ طبقه ($>0/11$ و $0/06-0/11$ و $<0/06$) ارائه شد. رابطه اندازه شاخص NDVI با نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی عکس بود. به بیان دیگر با افزایش شاخص NDVI، اندازه نسبت فراوانی رخدادهای فرسایش آبکندی کاهش یافت.

اندازه بارندگی

عامل بارندگی، یکی از متغیرهای مهم پیش‌بینی‌کننده در زمینه ظرفیت‌یابی فرسایش آبکندی است (گاین و همکاران، ۲۰۱۹؛ لی و همکاران، ۲۰۲۰؛ و همکاران، ۲۰۲۲). در این

جدول ۴- نتایج رابطه میان هر عامل مؤثر بر رخداد فرسایش آب‌کندی و معادله‌های مدل وزن شاهد و مدل دمپستر- شیفر.

Table 4- The results of the relationship between each factor affecting the occurrence of gully erosion and the Wight of Evidence model and the Dempster-Schiffer model.

Parameter	Class	Class area in pixel	Gully erosion area in pixel	FreqR	W=C/S (C)	Belief factor	Belief function	uncertainty
Hillshad	0.005-0.65	252043	14	0.46	-3.118	0.458	0.139	0.584
	0.65-0.82	806210	133	1.36	4.626	1.361	0.414	0.398
	0.82-1	623944	69	0.91	-0.929	0.912	0.278	0.456
	1-1.91	223585	15	0.55	-2.431	0.553	0.168	0.561
Slope aspect	Flat	599189	20	0.28	-6.739	0.275	0.025	0.829
	North	135471	5	0.3	-2.745	0.304	0.027	0.857
	Northeast	184001	6	0.27	-3.356	0.269	0.024	0.857
	East	122902	37	2.48	5.674	2.484	0.221	0.68
	Southeast	125029	35	2.31	5.088	2.31	0.206	0.694
	South	182534	54	2.44	6.806	2.441	0.218	0.689
	Southwest	278469	44	1.3	1.901	1.304	0.116	0.779
	West	167726	16	0.79	-1.003	0.787	0.07	0.817
	Northwest	110461	14	1.05	0.172	1.046	0.093	0.797
Climoatology	SemiArid	944038	35	0.28	-9.288	0.306	0.131	0.314
	Mediterian	818558	195	1.83	10.879	1.966	0.844	0.066
	SemiHumid	143186	1	0.05	-3.288	0.058	0.025	0.62
Convergence	<-17.23	85342	15	1.45	1.472	1.45	0.389	0.367
	-17.23 to -0.20	710248	98	1.14	1.618	1.138	0.306	0.466
	-17.7	1031636	116	0.93	-1.193	0.928	0.249	0.481
Convergence	>17.5	78556	2	0.21	-2.244	0.21	0.056	0.686
	concave(-18.24 to -0.1)	424926.1	47	0.91	-0.712	0.913	0.356	0.286
Curvature	flat(-0.1-0.1)	1178027	166	1.16	3.117	1.163	0.453	0.289
	Convex(0.1-20.64)	302829.1	18	0.49	-3.278	0.49	0.191	0.425
Curvature classification	1	594568	88	1.22	2.254	1.221	0.152	0.735
	2	162462	16	0.81	-0.868	0.812	0.101	0.772
	3	144082	16	0.92	-0.364	0.916	0.114	0.76
	4	80724	13	1.33	1.047	1.329	0.165	0.711
	5	110171	16	1.2	0.745	1.198	0.149	0.727
	6	225073	21	0.77	-1.276	0.77	0.096	0.775
	7	143161	17	0.98	-0.088	0.98	0.122	0.753
	8	445541	44	0.81	-1.551	0.815	0.101	0.766
Distance drainage	to 0-100	684723	138	1.66	7.254	1.663	0.523	0.348
	100-150	569668	70	1.01	0.137	1.014	0.319	0.478
	150-250	379298	23	0.5	-3.685	0.5	0.157	0.613
	250-500	207625	0	0	-1.753	0	0	0.771
	>500	64468	0	0	-0.523	0	0	0.789
Drainage density	0-1.2	382219	1	0.02	-4.047	0.022	0.005	0.688
	1.2-1.7	583825	12	0.17	-7.039	0.17	0.038	0.625
	1.7-2.7	569841	74	1.07	0.708	1.071	0.239	0.521
	2.7-3.34	369897	144	3.21	14.198	3.213	0.718	0.167
Altitude	<1000	956067	122	1.05	0.804	1.053	0.466	0.342
	1000-1500	746702	109	1.2	2.482	1.204	0.534	0.29

جدول ۴- نتایج رابطه میان هر عامل مؤثر بر رخداد فرسایش آبکندی و معادله‌های مدل وزن شاهد و مدل دمپستر- شیفر.

Table 4- The results of the relationship between each factor affecting the occurrence of gully erosion and the Wight of Evidence model and the Dempster-Schiffer model.

Parameter	Class	Class area in pixel	Gully erosion area in pixel	FreqR	W=C/S (C)	Belief factor	Belief function	uncertainty
Landuse	1500-2000	175577	0	0	-1.469	0	0	0.777
	2000-2500	27323	0	0	-0.22	0	0	0.794
	2500-2612	113	0	0	-0.001	0	0	0.797
	Orchard	1913	0	0	-0.015	0	0	0.84
	Forest	804167	60	0.62	-4.883	0.616	0.101	0.694
	Agriculture	286101	147	4.24	16.77	4.241	0.697	0.235
	PoorRange	766343	21	0.23	-8.328	0.226	0.037	0.719
	Rock	24682	3	1	0.005	1.003	0.165	0.675
Litology	DensForest	22576	0	0	-0.181	0	0	0.838
	Group1	665907	29	0.36	-6.645	0.359	0.055	0.682
	Group2	240751	124	4.25	15.777	4.251	0.652	0.244
	Group3	229065	11	0.4	-1.176	0.396	0.061	0.727
	Group4	350767	50	1.18	1.269	1.176	0.18	0.631
Slope-Length	Group5	419292	17	0.33	-5.029	0.334	0.051	0.716
	0-2.5	829901	132	1.31	4.117	1.312	0.409	0.436
	2.5-5	476742	76	1.32	2.75	1.315	0.41	0.407
	5-8.5	368528	20	0.45	-3.966	0.448	0.14	0.629
	8.5-13	189692	3	0.13	-3.663	0.13	0.041	0.736
NDVI	13-56.7	40919	0	0	-0.33	0	0	0.792
	<0.15	472136	14	0.24	-5.912	0.245	0.063	0.539
	0.15-0.25	1144150	120	0.87	-2.499	0.865	0.223	0.393
	>0.25	289496	97	2.76	10.478	2.765	0.714	0.068
Plan Cruvature	concavepl(-9.74 to -0.1)	206173	17	0.68	-1.68	0.68	0.266	0.368
	flatpl(-0.1-0.1)	1181404	171	1.19	3.72	1.194	0.467	0.293
	convexpl(0.1-10.23)	518205	43	0.68	-2.901	0.685	0.268	0.339
Profile Cruvature	convexprf(-19.30 to -0.1)	92573	1	0.09	-2.458	0.089	0.041	0.605
	flatprf(-0.1-0.1)	944431	126	1.1	1.514	1.101	0.506	0.19
	concaveprf(0.1-11.86)	868778	104	0.99	-0.172	0.988	0.454	0.205
Rian	<400	359678	14	0.32	-4.652	0.321	0.08	0.632
	400-500	585724	37	0.52	-4.707	0.521	0.13	0.568
	500-550	521374	68	1.08	0.709	1.076	0.267	0.49
	>550	439006	112	2.1	8.704	2.105	0.523	0.31
Slope gradient	<5	635711	95	1.23	2.493	1.233	0.357	0.464
	5-12	558519	107	1.58	5.557	1.581	0.457	0.389
	12-25	384693	27	0.58	-3.162	0.579	0.167	0.608
	25-40	254915	2	0.06	-4.045	0.065	0.019	0.749
	>40	71943	0	0	-0.585	0	0	0.789
Soil type	Rock-Inceptisol	521186	101	1.6	5.464	1.599	0.34	0.505
	XBL BadLands	468052	5	0.09	-5.947	0.088	0.019	0.72
	Rock-Entisol	640686	96	1.24	2.543	1.236	0.263	0.56
	Inceptisol-Vertisol	100699	12	0.98	-0.061	0.983	0.209	0.59
	Inceptisol	175159	17	0.8	-0.292	0.801	0.17	0.625
Stream power	-13.5_-10	170192	16	0.78	-1.065	0.776	0.163	0.631
	-10_-5.5	273052	31	0.94	-0.394	0.937	0.197	0.6
	-5.5_-0.8	461288	61	1.09	0.781	1.091	0.23	0.575
	-0.8_3.5	634992	87	1.13	1.398	1.13	0.238	0.574
	3.5_7.69	366259	36	0.81	-0.615	0.811	0.171	0.619
Surface texture	<12.25	461783	91	1.63	5.268	1.626	0.417	0.384

جدول ۴- نتایج رابطه میان هر عامل مؤثر بر رخداد فرسایش آب‌بندی و معادله‌های مدل وزن شاهد و مدل دمپستر-شیفر.

Table 4- The results of the relationship between each factor affecting the occurrence of gully erosion and the Wight of Evidence model and the Dempster-Schiffer model.

Parameter	Class	Class area in pixel	Gully erosion area in pixel	FreqR	W=C/S (C)	Belief factor	Belief function	uncertainty
Catchment area	12.25-17.7	569929	89	1.29	2.845	1.288	0.33	0.451
	17.7-23.5	594460	33	0.46	-5.322	0.458	0.117	0.571
	>23.5	279610	18	0.53	-2.894	0.531	0.136	0.594
	<0.1	1750392	192	0.9	-1.384	0.905	0.071	0.513
	0.1-5	137417	28	1.68	0	1.681	0.131	0.679
	5-10	4733	3	5.23	0.16	5.232	0.409	0.393
	>10	13240	8	4.98	0.422	4.987	0.389	0.415
Topographic wetness	1.8_3	551715	52	0.78	-2.148	0.875	0.199	0.543
	3.3_4.85	682319	84	1.02	0.178	0.778	0.177	0.552
	4.85_14.14	228672	48	1.73	4.035	1.016	0.231	0.523
Vertical distance to channel network	<0	667954	94	1.16	1.064	1.732	0.394	0.382
	0-2	471315	72	1.26	1.128	1.161	0.335	0.435
	2-10	582839	61	0.86	-1.375	1.26	0.364	0.406
	>10	183674	4	0.18	-3.57	0.863	0.249	0.484

و نیمه‌خشک به ترتیب ۲/۷۸- و ۰/۶۶ به دست آمد. رابطه میان عامل هم‌گرایی و اندازه‌های وزن شاهد عکس بود. به بیان دیگر، با افزایش اندازه هم‌گرایی (از اندازه منفی به سوی اندازه مثبت)، اندازه‌های وزن شاهد کاهش یافت. اندازه‌های کمینه و بیشینه وزن شاهد برای عامل هم‌گرایی در آبخیز ایلام به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۳۹ به دست آمد. رابطه میان اندازه عامل انحنا کلی سطح زمین (هم‌گرا، صاف و واگرا) با اندازه‌های وزن شاهد عکس بود. به بیان دیگر، با افزایش اندازه انحنا کلی (از اندازه منفی به سوی اندازه مثبت)، اندازه‌های وزن شاهد کاهش یافت. اندازه‌های کمینه و بیشینه وزن شاهد برای عامل انحنا سطح زمین (انحنای واگرا و هم‌گرا) به ترتیب ۰/۶۲- و ۰/۰۷- به دست آمد. نتایج نشان داد که رابطه میان طبقه‌های انحنا سطح زمین با اندازه‌های وزن شاهد عکس بود. به بیان دیگر با افزایش طبقه انحنا سطح زمین اندازه وزن شاهد کاهش یافت. اندازه‌های کمینه و بیشینه وزن شاهد برای عامل طبقه‌بندی انحنا سطح زمین به ترتیب ۰/۲۳۱- و ۰/۲۷۰ به دست آمد. نتایج اندازه‌های وزن شاهد برای عامل فاصله از آبراهه نشان داد که با افزایش فاصله از آبراهه اندازه وزن شاهد کاهش یافت. دو طبقه فاصله از آبراهه بیشتر از ۵۰۰ متر و کمتر از ۱۰۰ متر منطبق با اندازه‌های کمینه و بیشینه وزن شاهد به ترتیب ۰/۵۸- و ۰/۱۲ به دست آمد. نتایج اندازه‌های وزن شاهد و تابع باور برای عامل تراکم آبراهه نشان داد با افزایش تراکم آبراهه اندازه وزن شاهد و تابع باور نیز افزایش یافت. دو طبقه تراکم آبراهه کمتر از ۱/۲ کیلومتر در کیلومتر مربع و بیشتر از ۲/۷ کیلومتر در کیلومتر مربع منطبق با اندازه‌های کمینه و بیشینه وزن شاهد به ترتیب ۳/۶۲- و ۰/۴۱ به دست آمد. اندازه عامل بلندی با اندازه‌های وزن شاهد

نتایج اجرای مدل‌های وزن شاهد و دمپستر-شیفر و پهنه‌بندی فرسایش آب‌بندی

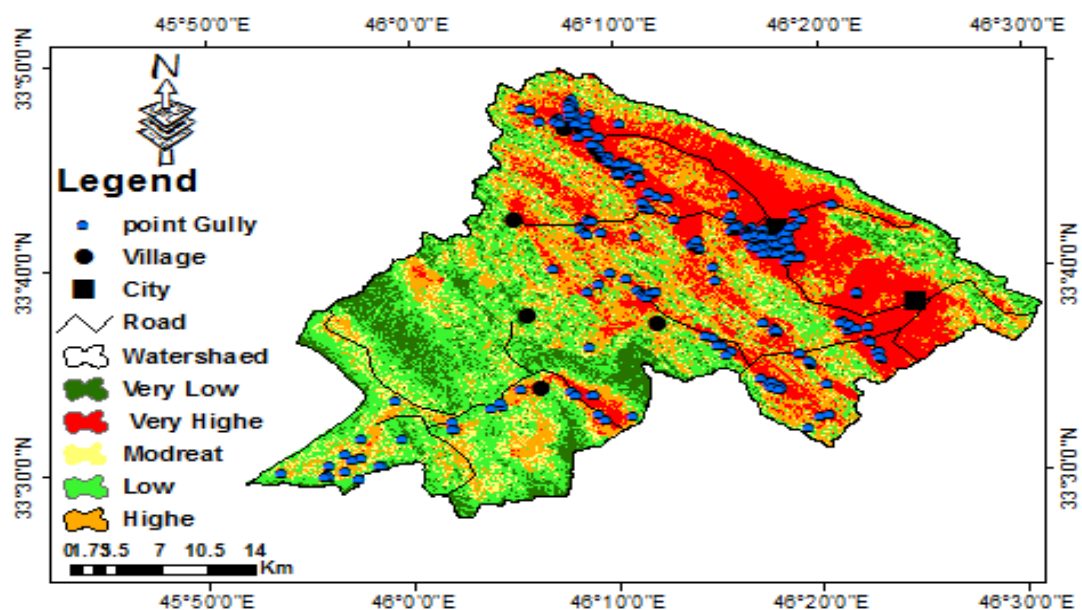
از آنجایی که روند افزایش یا کاهش اندازه‌های وزنی در این دو مدل مشابه یکدیگر بود، فقط نتایج وزنی مربوط به مدل وزن شاهد بررسی شد. همچنین در این پژوهش، در روش وزن شاهد اندازه وزن‌ها، منفی بود و در تابع باور دمپستر-شیفر داده‌ها میان صفر و یک بودند. نتایج وزن‌های محاسبه شده از رابطه میان عامل تحلیل سایه روشن با رخداد فرسایش آب‌بندی از اجرای مدل وزن شاهد و دمپستر-شیفر نشان داد که با افزایش اندازه سایه روشن، اندازه وزن شاهد و تابع باور دمپستر-شیفر رخداد فرسایش آب‌بندی کاهش یافت و از اندازه مثبت به اندازه منفی تغییر یافت. اندازه‌های کمینه و بیشینه وزن شاهد و تابع باور دمپستر-شیفر ۰/۷۰- تا ۰/۰۱ و ۰/۱۴ تا ۰/۴۱ بود. نتایج بررسی عامل جهت شیب نشان داد که جهت شیب شمالی بیشترین و جهت شیب صاف و جنوبی کمترین اندازه وزن شاهد و تابع باور دمپستر-شیفر را کسب کرد. اندازه‌های کمینه وزن شاهد در جهت شیب جنوب‌شرق و جنوب به ترتیب ۱/۱۴- و ۱- به دست آمد و اندازه تابع باور دمپستر-شیفر در شیب صاف و جنوبی ۰/۰۲ بود و در شمال، شمال‌شرق و شمال‌غرب ۰/۲۲ محاسبه شد در جهت شیب شمال و شمال‌شرق ۰/۲۱ بود. همچنین، اندازه‌های بیشینه وزن شاهد به ترتیب ۰/۸۰ و ۰/۷۴ به دست آمد که این نتایج نشان داد که اندازه‌های کمینه و بیشینه تابع باور دمپستر-شیفر برای جهت شیب مناسب‌تر بود. به طور کلی اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب کمترین و اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک بیشترین اندازه وزن شاهد و تابع باور دمپستر-شیفر را کسب کردند. اندازه‌های کمینه و بیشینه وزن شاهد برای اقلیم‌های نیمه‌مرطوب

وزن شاهد و تابع باور نیز افزایش یافت. اندازه‌های نتایج وزن شاهد و تابع برای عامل سطح زهکشی نشان داد با افزایش اندازه سطح زهکشی اندازه وزن شاهد و تابع باور نیز افزایش یافت. اندازه‌های نتایج وزن شاهد و تابع باور برای عامل رطوبت زهکشی نشان داد با افزایش اندازه رطوبت زهکشی اندازه وزن شاهد و تابع باور نیز افزایش یافت. اندازه‌های نتایج وزن شاهد و تابع باور برای عامل فاصله عمودی از شبکه آبراهه نشان داد با افزایش اندازه فاصله عمودی از شبکه آبراهه اندازه وزن شاهد و تابع باور کاهش یافت.

نتایج نقشه طبقه‌بندی حساسیت زمین‌ها نسبت به فرسایش آبکندی در مدل وزن شاهد

نتایج نقشه طبقه‌های پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش آبکندی با استفاده از مدل وزن شاهد (WOE) در جدول ۵ نشان داده شده است. درصد مساحت طبقه‌های حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم به ترتیب ۲۷/۹، ۲۱/۹۲، ۷/۹، ۲۸/۱۵ و ۱۴/۱۳ بود. همچنین، درصد رخداد فرسایش آبکندی در طبقه‌های حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم به ترتیب ۸۷/۲۳، ۶/۳۸، ۲/۷۴، ۳/۰۴ و ۰/۶۱ محاسبه شد. به بیان دیگر، طبقه‌های حساسیت خیلی زیاد و زیاد روی هم بیش از ۴۹٪ بود و در آبخیز ایلام این دو طبقه حساسیت (خیلی زیاد و زیاد) بیش از ۹۳٪ از رخدادهای فرسایش آبکندی را در بر گرفتند.

از طبقه ۱ تا ۳ وزن شاهد افزایش و سپس در طبقه‌های ۴ و ۵ کاهش یافت. اندازه‌های کمینه و بیشینه نتایج وزن شاهد در کاربری زمین‌های مرتع فقیر و ترکیب زراعت و مرتع به ترتیب ۱/۰۷- و ۰/۶۰ محاسبه شد. اندازه‌های کمینه و بیشینه نتایج وزن شاهد برای عامل سنگ‌شناسی گروه‌های ۱ و ۴ به ترتیب ۰/۹۲- و ۰/۸۴ محاسبه شد. اندازه‌های کمینه و بیشینه نتایج وزن شاهد عامل طول شیب برای طبقه ۲۷/۶ تا ۲۳۵ متر و ۱۳/۳۵ تا ۱۴/۲ متر به ترتیب ۱/۹۴- و ۰/۱۶ محاسبه شد. رابطه میان اندازه‌های نتایج وزن شاهد برای عامل NDVI عکس بود. یعنی با افزایش NDVI اندازه وزن شاهد کاهش یافت. اندازه‌های نتایج وزن شاهد و تابع باور برای عامل انحنای عرضی نشان داد که اندازه وزن شاهد طبقه هم‌گرا در مقایسه با طبقه واگرا بیشتر بود. اندازه‌های نتایج وزن شاهد و تابع باور برای عامل بارش نشان داد که با افزایش بارش اندازه وزن شاهد و تابع باور نیز افزایش یافت. اندازه‌های نتایج وزن شاهد و تابع باور برای عامل درجه شیب نشان داد که با افزایش اندازه شیب اندازه وزن شاهد و تابع باور کاهش یافت. اندازه‌های نتایج وزن شاهد و تابع باور برای عامل نوع خاک نشان داد که بیشترین رخداد فرسایش آبکندی در خاک اینستپتی‌سویل مشاهده شد. اندازه‌های نتایج وزن شاهد و تابع باور برای عامل توان آبراهه نشان داد که با افزایش اندازه توان آبراهه اندازه وزن شاهد و تابع باور نیز افزایش یافت. اندازه‌های نتایج وزن شاهد و تابع باور برای عامل بافت سطحی نشان داد با افزایش اندازه بافت، اندازه



شکل ۶- نقشه طبقه‌های پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی با استفاده از مدل وزن شاهد (WOE).

Figure 6- Map of zoning classes of gully erosion susceptibility using weight of witness model (WOE).

جدول ۵- اندازه‌های شاخص نسبت فراوانی در هر طبقه از نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش آبکندی در مدل وزن شاهد.

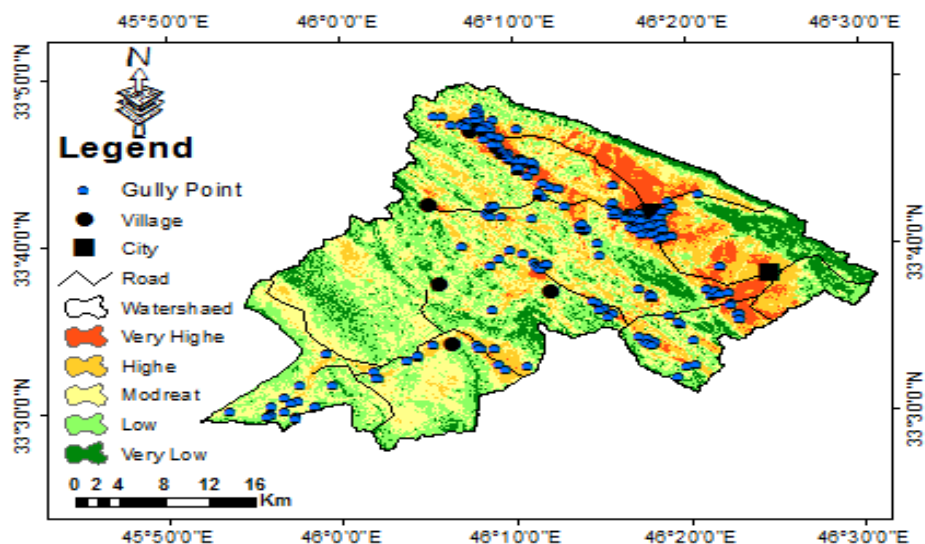
Table 5- Values of the abundance ratio index in each floor of the zoning map of susceptibility to gully erosion in the Wight of Evidence Model.

Number	Class	Gully erosion pixel	Gully%	Class pixel	Class pixel%	FR	SCAI
1	Low very	2	0.61	269265	14.13	0.04	23.25
2	Low	10	3.04	536408	28.15	0.11	9.26
3	Modreat	9	2.74	150439	7.9	0.35	2.89
4	Highe	21	6.38	417556	21.92	0.29	3.43
5	Highe very	287	87.23	531587	27.9	3.13	0.32

همچنین، درصد رخداد فرسایش آبکندی در طبقه‌های حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم به ترتیب ۶۵/۶۵، ۲۱/۲۸، ۹/۴۲، ۳/۳۴ و ۰/۳۰ به دست آمد. به بیان دیگر، طبقه‌های حساسیت خیلی زیاد و زیاد روی هم بیش از ۲۷٪ سطح آبخیز را کسب کرد. همچنین، این دو طبقه حساسیت (خیلی زیاد و زیاد) بیش از ۸۶٪ از رخدادهای فرسایش آبکندی را در بر گرفتند.

نتایج نقشه‌های طبقه‌بندی حساسیت زمین‌ها نسبت به فرسایش آبکندی در مدل دمپستر-شیفر

نتایج نقشه طبقه‌های پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش آبکندی با استفاده از مدل دمپستر-شیفر در جدول ۶ نشان داده شده است. درصد مساحت طبقه‌های حساسیت فرسایش آبکندی خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم به ترتیب ۳۶/۹، ۴۸/۱۸، ۲۶/۲۶، ۳۰ و ۱۵/۸۹ محاسبه شد.



شکل ۷- نقشه طبقه‌های پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی با استفاده از مدل دمپستر-شیفر.

Figure 7- Map of zoning classes of gully erosion susceptibility using the Dempster-Shafer Model

جدول ۶- اندازه‌های شاخص نسبت فراوانی و سطح سلول هسته در هر طبقه از نقشه پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش آبکندی در مدل دمپستر-شیفر.

Table 6- Index values of abundance ratio and nucleus cell area in each floor of the zoning map of gully erosion susceptibility in the Dempster-Shafer Model.

Number	Class	Gully erosion pixel	Gully (%)	Class pixel	Class pixel (%)	FR	SCAI
1	Low very	1	0.3	302829	15.89	0.02	52.29
2	Low	11	3.34	571507	30	0.11	8.97
3	Modreat	31	9.42	500385	26.26	0.36	2.79
4	Highe	70	21.28	352149	18.48	1.15	0.87
5	Highe very	216	65.65	178385	9.36	7.01	0.14

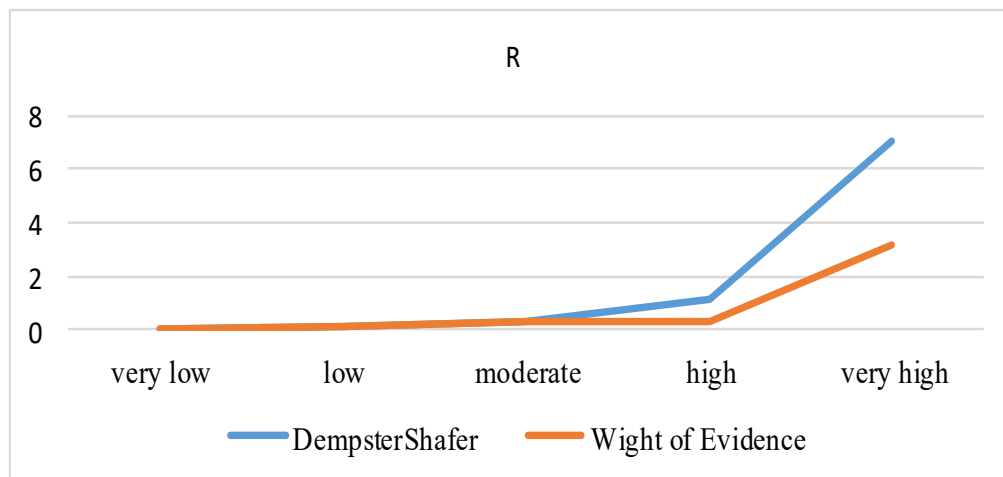
هسته تقریباً در هر دو مدل، عکس بود یعنی با افزایش حساسیت زمین‌ها نسبت به رخداد فرسایش آبکندی، شاخص نسبت فراوانی افزایش یافت ولی شاخص سطح سلول هسته کاهش یافت. اندازه شاخص نسبت فراوانی در

مقایسه نتایج مدل‌ها

شاخص‌های نسبت فراوانی و سطح سلول هسته مدل‌های دمپستر-شیفر و وزن شاهد در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده است. رابطه میان دو شاخص نسبت فراوانی و سطح سلول

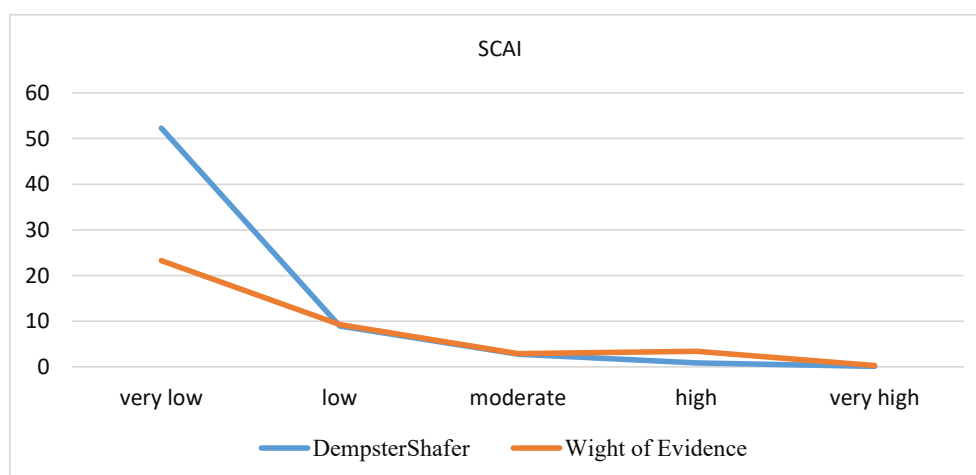
فراوانی مدل‌های دمپستر-شیفر و وزن شاهد افزایشی بود. باید توجه داشت که روند شاخص سطح سلول هسته در هر دو مدل کاهش می‌یافت.

هر دو مدل برای رده‌های خیلی کم تا متوسط حساسیت زمین‌ها نسبت به رخداد فرسایش آبکندی با شیب نسبتاً ملایم افزایش یافت و برای رده‌های زیاد تا خیلی زیاد به شکل قابل توجهی افزایش یافت. روند تغییرات شاخص نسبت



شکل ۸- مقایسه منحنی شاخص نسبت فراوانی طبقه‌های حساسیت فرسایش آبکندی در دو مدل.

Figure 8- Comparison of the index diagram of frequency ratio of gully erosion susceptibility classes in two models.



شکل ۹- مقایسه منحنی شاخص سطح سلول هسته طبقه‌های حساسیت فرسایش آبکندی در دو مدل.

Figure 9- Comparison of the graph of the core cell surface index of gully erosion susceptibility classes in two models.

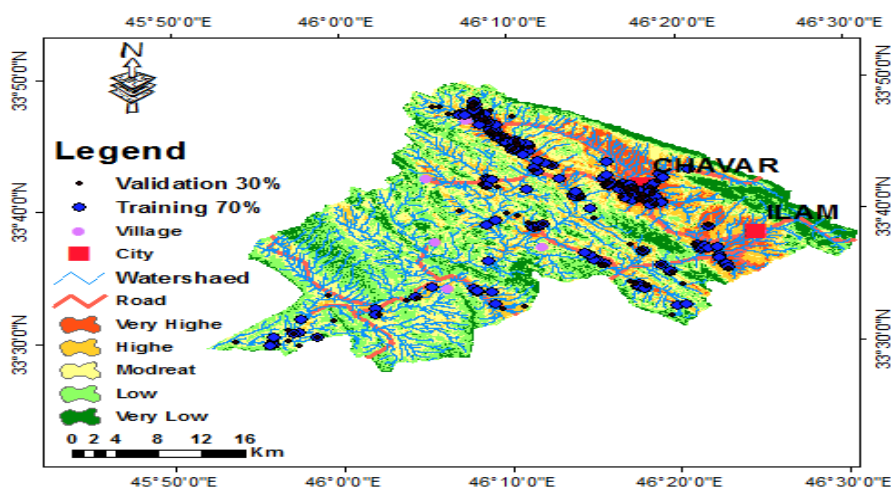
شدند. سپس داده‌ها به فایل اکسل انتقال داده شدند و با استفاده از نرم‌افزار SPSS تحلیل و بررسی شدند. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی دو مدل دمپستر-شیفر و وزن شاهد با استفاده از سطح زیر منحنی (AUC) و مشخصه عملکرد دریافت کننده (ROC) در جدول ۷ و ۸ آورده شده است. اندازه‌های AUC مدل‌های دمپستر-شیفر و وزن شاهد در مرحله واسنجی به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۹۰ محاسبه شد. به بیان دیگر، در مرحله واسنجی اندازه‌های کمینه و بیشینه سطح زیر منحنی شاخص مشخصه عملکرد دریافت کننده از ۰/۸۹ تا ۰/۹۷ متغیر بود. این

نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها

در این پژوهش، نقشه پراکنش فرسایش آبکندی برای ۳۳۱ آبکند تهیه و راقمی شد که از این تعداد آبکند ۷۰٪ (۲۳۲ آبکند) برای آموزش و از ۳۰٪ باقی‌مانده (۹۹ آبکند) برای اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شد و در این راستا از منحنی مشخصه عملکرد ساختار ROC و مساحت سطح زیر منحنی AUC استفاده شد (شکل ۱۱). ابتدا داده‌های به‌دست آمده از نقشه‌های پهنه‌بندی فرسایش آبکندی با استفاده از هر دو مدل وزن شاهد و دمپستر-شیفر به نقاط مربوط به ۹۹ آبکند و ۲۳۲ آبکند به شکل مجزا برازش داده

خوب، خیلی خوب و عالی از طبقه‌بندی سطح زیر منحنی منطبق بود. اندازه‌های سطح زیرمنحنی مدل‌ها در مرحله پیش‌بینی اندکی کمتر از مرحله واسنجی بود. به‌طور کلی، نتایج سطح زیرمنحنی در مرحله واسنجی و هم در مرحله پیش‌بینی نشان داد که بیشترین و کمترین دقت مربوط به مدل وزن شاهد بود. از این رو، مدل دمستر-شیفر و وزن شاهد به‌ترتیب کارآمد بودند. این یافته‌ها با نتایج پژوهش صابرچناری و همکاران (۲۰۱۶) هم‌راستا است.

اندازه‌ها با طبقه‌های کارآمدی یا دقت خوب، خیلی خوب و عالی از طبقه‌بندی سطح زیر منحنی منطبق بود (شکل ۱۲). همچنین، اندازه‌های ROC مدل‌های دمپستر-شیفر و وزن شاهد در مرحله اعتبارسنجی یا پیش‌بینی در آبخیز ایلام به‌ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۸۱ محاسبه شد. به بیان دیگر، در مرحله پیش‌بینی رخداد فرسایش آب‌کندی اندازه‌های کمینه و بیشینه سطح زیر شاخص مشخصه عملکرد دریافت‌کننده از ۰/۸۰ تا ۰/۹۶ متغیر بود (شکل ۱۲). این اندازه‌ها با طبقه‌های کارآمدی یا دقت



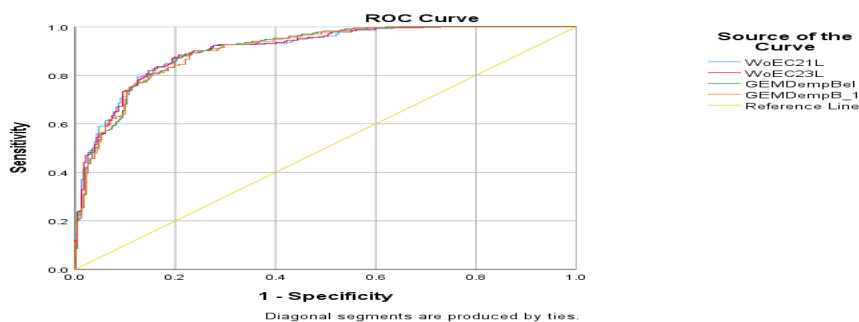
شکل ۱۰- تلفیق داده آموزشی و آزمایشی با خروجی مدل.

Figure 10- Combination of training and test data with model output.

جدول ۷- نتایج تحلیل ROC در مرحله واسنجی مدل‌ها بر اساس ۷۰٪ داده‌های پراکنش رخداد فرسایش آب‌کندی.

Table 7- The results of ROC analysis in the model calibration stage based on 70% of the distribution data of gully erosion events.

Test Result Variable(s)	Area	Std. Error	Asymptotic Sig.b	Asymptotic 95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
DempsterShafer	0.908	0.013	0	0.881	0.934
Wight of Evidence	0.905	0.014	0	0.879	0.932



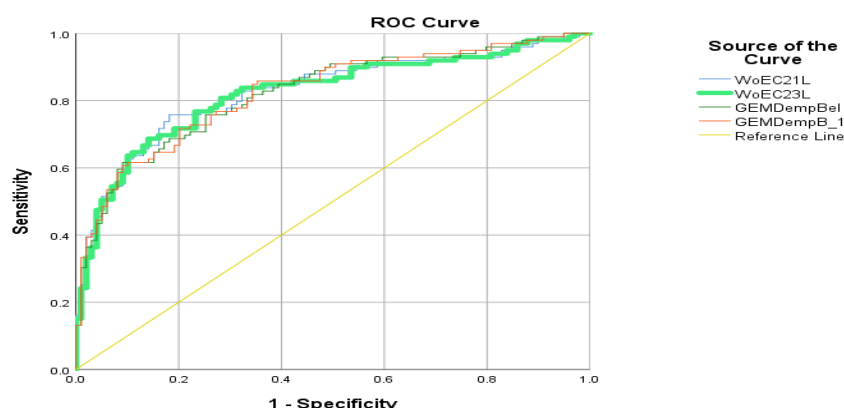
شکل ۱۱- منحنی مشخصه عملکرد وزن شاهد و دمپستر-شیفر در مرحله واسنجی با استفاده از ۷۰٪ پراکنش رخداد آب‌کندی.

Figure 11- The characteristic curve diagram of Wight of Evidence and Dempster-Shafer performance in the calibration phase using 70% distribution of the occurrence of gully.

جدول ۸- نتایج تحلیل سطح زیرمنحنی ROC در مرحله پیش‌بینی بر اساس ۳۰٪ داده‌های پراکنش رخداد فرسایش آبکندی.

Table 8- The results of the analysis of the level under the ROC curve in the prediction stage based on 30% of the distribution data of the gully erosion event.

Test Result Variable(s)	Area	Std. Errora	Asymptotic Sig.b	Asymptotic 95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
DempsterShafer	0.908	0.013	0	0.881	0.934
Wight of Evidence	0.905	0.014	0	0.879	0.932



شکل ۱۲- منحنی مشخصه عملکرد دمپستر-شیفر و وزن شاهد در مرحله پیش‌بینی با استفاده از ۳۰٪ پراکنش رخداد آبکندها

Figure 12 - Dempster-Shafer performance curve diagram and witness weight in the prediction stage using 30% distribution of the occurrence of gullies.

نتیجه‌گیری

خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم به ترتیب ۶۵/۶۵، ۲۱/۲۸، ۹/۴۲، ۳/۳۴ و ۰/۳۰ به دست آمد. به بیان دیگر، طبقه‌های حساسیت خیلی زیاد و زیاد روی هم بیش از ۲۷٪ سطح آبخیز بود. همچنین، این دو طبقه حساسیت (خیلی زیاد و زیاد) بیش از ۸۶٪ از رخداد‌های فرسایش آبکندی را در بر گرفتند که با نتایج پژوهش صابرچناری و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد.

نتایج اعتبارسنجی و کارآمدی مدل‌ها بر اساس نقشه پراکنش آبکندها (۷۰٪ آموزشی و ۳۰٪ آزمایشی) با استفاده از سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد ساختار ROC و مساحت سطح زیر منحنی AUC نشان داد که در منطقه پژوهشی، عملکرد مدل دمپستر-شیفر با ضریب تبیین ۰/۹۳۴ و مدل وزن شاهد با ضریب تبیین ۰/۹۳۲ خوب بود. این یافته با نتایج پژوهش یانگ و همکاران (۲۰۱۹)، هیتوری و همکاران (۲۰۲۳) مطابقت دارد. همچنین، آستانه‌های عامل‌های مؤثر شامل بارش ۱۰۰-۷۵۰ میلی‌متر، سنگ‌شناسی رسوبات منفصل، شیل و مارن، بلندی ۰ تا ۱۵۰۰ متر، تراکم آبراهه ۰/۷-۳/۲ کیلومتر در کیلومتر مربع، نوع خاک اینسپتی‌سویل یا لیتیک‌کلسی‌زریپت، درجه شیب ۱۲/۵٪، کاربری زمین‌های کشاورزی و باغ و زمین بایر، شاخص

نتایج خروجی لایه‌ها، وزن‌دهی، طبقه‌بندی و تلفیق در دو مدل وزن شاهد و دمپستر-شیفر سبب تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت فرسایش پذیری آبکندها شد که در مدل وزن شاهد درصد مساحت طبقه‌های حساسیت خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم به ترتیب ۲۷/۹، ۲۱/۹۲، ۷/۹، ۲۸/۱۵ و ۱۴/۱۳ به دست آمد. همچنین، با استفاده از مدل وزن شاهد درصد رخداد فرسایش آبکندی در طبقه‌های حساسیت خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم به ترتیب ۸۷/۲۳، ۶/۳۸، ۲/۷۴، ۳/۰۴ و ۰/۶۱ محاسبه شد. به بیان دیگر، طبقه‌های حساسیت خیلی‌زیاد و زیاد روی هم بیش از ۴۹٪ بود. در آبخیز ایلام این دو طبقه حساسیت (خیلی‌زیاد و زیاد) بیش از ۹۳٪ از رخداد‌های فرسایش آبکندی را در بر گرفتند. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های داب و همکاران (۲۰۱۴) و شیت و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد. در مدل دمپستر-شیفر بر پایه داده‌های نقشه خروجی، درصد مساحت طبقه‌های حساسیت فرسایش آبکندی خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم به ترتیب ۹/۳۶، ۱۸/۴۸، ۲۶/۲۶، ۳۰ و ۱۵/۸۹ محاسبه شد. همچنین با استفاده از دمپستر-شیفر درصد رخداد فرسایش آبکندی در طبقه‌های حساسیت

بهنجار شده تفاوت پوشش گیاهی ۰/۵۰ - ۰/۰۷۵، تحلیل سایه روشن ۰/۷۷ - ۰/۵۵، شاخص رطوبت پستی بلندی ۸/۱۴-۳/۵، شاخص هم‌گرایی ۰/۱ - تا ۰/۱، انحنای دامنه ۰/۱ - تا ۰/۱، وجه شیب ۶۷/۵ و ۲۹۲/۵ درجه، فاصله از آبراهه ۲۵-۲۰۰ متر، فاصله عمودی از شبکه آبراهه ۴۰۰-۰ متر، انحناء ۰/۱ - تا ۰/۱، اقلیم فراخشک و نیمه‌خشک، سطح زهکشی آبخیز ۰/۱ کیلومتر مربع، انحناء مقطع ۰/۱ - تا ۰/۱، طول شیب ۲۰-۲۰۰ متر و بافت سطح زمین ۵/۵-۸/۵ بود.

پیشنهادهای

بر اساس نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود با استفاده از DEM با قدرت تفکیک مکانی بیشتر و مقایسه نتایج

خروجی با دقت‌های متفاوت سنجه‌های پستی بلندی (تهیه نقشه DEM با دقت‌های ۲ متر با روش تصویرسنجی و...) ارزیابی شود. همچنین، از دیگر شاخص‌ها و سنجه‌های تأثیرگذار بر اساس نوع منطقه (خط گسل و نقشه زمین‌ساخت) برای اجرای مدل استفاده شود. همچنین پیشنهاد می‌شود تا مدیران حفاظت خاک و برنامه‌ریزان از نقشه‌های پهنه‌بندی در عملیات حفاظت خاک استفاده کنند. همچنین از دیگر روش‌ها و مدل‌های آماری در پهنه‌بندی فرسایش آبی و مقایسه نتایج آن‌ها استفاده شود. پیشنهاد می‌شود پایش روند توسعه و گسترش آبکندها در منطقه مطالعه‌شده قبل و بعد از اقدام‌های اصلاحی و احیایی پوشش گیاهی و عملیات مکانیکی مهار آبکندها انجام شود.

فهرست منابع

- Angileri SE, Conoscenti C, Hochschild V, Märker M, Rotigliano E, Agnesi V. 2016. Water erosion susceptibility mapping by applying Stochastic Gradient Treeboost to the Imera Meridionale River Basin (Sicily, Italy).-Geomorphology,262(73): 61-76. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03018>.
- Azedou A, Lahssini S, Khattabi A, Meliho M, Rifai N. 2021. A methodological comparison of three models for gully erosion susceptibility mapping in the rural municipality of El Faïd (Morocco). Sustainability, 13(2):658-682. <https://doi.org/10.3390/su13020682>.
- Ciccolini Ugo, Margherita Bufalini, Marco Materazzi, Francesco Dramis. 2024. Gully erosion development in drainage basins: A new morphometric approachland, 13, no. 6(32): 792. <https://doi.org/10.3390/land13060792>
- Conoscenti C, Rotigliano E. 2020. Predicting gully occurrence at watershed scale: Comparing topographic indices and multivariate statistical models. Geomorphology, pp. 335- 359. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107123>
- Conoscenti C, Angileri S, Cappadonia C, Rotigliano E, Agnesi V, Märker M. 2014. Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy). Geomorphology, 204(1): 399-411. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.021>.
- Dube F, Nhapi I, Murwira A, Gumindoga W, Goldin J, Mashauri DA. 2014. Potential of weight of evidence modeling for gully erosion hazard assessment im Mbire District- Zimbabwe. Physics and Chemistry of the Earth, 67(69):145-152. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2014.02002>.
- Entezari M, Maleki A, Moradi Kh, Elfati S. 2014. Investigation of gully erosion in Deira catchment using weighted ntegration method and waterway capacity index. Geographical Research Quarterly, 3 (118): 297-312. (In Persian). <http://doi.org/10.1016/GRQ.2014.02.532>.
- Gayen A, Pourghasemi HR, Saha S, Keesstra S, Bai S. 2019. Gully erosion susceptibility assessment and management of hazard-prone areas in India using different machine learning algorithms, Science of the Total Environment, 668(45):124-138. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.436>.
- Gideon D, Mustafa FB, Victor I. 2021. The application of an expert knowledge-driven approach for assessing gully erosion susceptibility in the subtropical Nigerian savannah. Singapore Journal of Tropical Geography, 42(1): 107-131. <https://doi.org/10.1111/sjtg.12348>.
- Hitouri S, Varasano A, Mohajane M, Ijlil S, Essahlaoui N, Ali SA, Essahlaoui A, Pham QB, Waleed M, Palateerdham SK, Teodoro AC. 2022. Hybrid machine learning approach for gully erosion mapping susceptibility at a watershed scale. ISPRS International Journal of Geo-Information, 11(7): 384-40. <https://doi.org/10.3390/ijgi11070401>
- Igwe O, John UI, Solomon O, Obinna O. 2020. GIS-based gully erosion susceptibility modeling, adapting bivariate statistical method and AHP approach in Gombe town and environs Northeast Nigeria. Geoenvironmental Disasters, 7(12): 1-16. <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00166-8>
- Jafari Gorzin B, Kavian A, Solaimani K. (2023). Investigation of Land use Changes and Its Role in the Hydrology of the Upstream Areas of Siahroud Watershed.J Watershed Manage Res.14(27): 26-37. <https://doi.org/10.61186/jwmr.14.27.26>

- Jancewicz K, Migoń P, Kasprzak M. 2019. Connectivity patterns in contrasting types of tableland sandstone relief revealed by Topographic Wetness Index. *Science of the Total Environment*, 656(243): 1046-1062. <https://doi.org/10.1111/sjtg.12348>
- Lana JC, Castro PDTA, Lana CE. 2022. Assessing gully erosion susceptibility and its conditioning factors in southeastern Brazil using machine learning algorithms and bivariate statistical methods: A regional approach. *Geomorphology*, 324(48):378-402. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108159>
- Lei X, Chen W, Avand M, Janizadeh S, Kariminejad N, Shahabi H, Coştache R, Shahabi H, Shirzadi A, Mosavi A. 2020. GIS-based machine learning algorithms for gully erosion susceptibility mapping in a semi-arid region of Iran. *Remote Sensing*, 12(15):147-172. <https://doi.org/10.3390/rs.12152478>
- Liuzzo L, Sammartano V, Freni G. 2019. Comparison between different distributed methods for flood susceptibility mapping. *Water Resources Management*, 33(4):3155-3173. <https://doi.org/10.5194/nhess.2020-332>
- Maerker M, Que'ne'herve G, Bachofer F, Mori S. 2015. A simple dem assessment procedure for gully system analysis in the lake Manyara Area, northern Tanzania. 79(24):235-253. <https://doi.org/10.3390/su151512056>
- Mohtashami Borzadaran, G R. 2021. Bayesian perspective over time. *Statistical Thinking*, 25 (2):1-11. <https://doi.org/10.2048/StT.2020-332>
- Rahmati O, Tahmasebipour N, Haghizadeh A, Pourghasemi HR, Feizizadeh B. 2017. Evaluating the influence of geo-environmental factors on gully erosion in a semi-arid region of Iran: An integrated framework. *Science of the Total Environment*, 579(78): 913-927. (In Persian). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.176>
- Rangzan K, zaheri Abdehvand Z, Mokarram M. 2022. Determining areas prone to gully erosion using fuzzy membership function (Case study: Mohr City in the south of Fars Province), *Quantitative Geomorphological Research*, 10(4): 56-74. <https://doi.org/20.1001.1.22519424.1401.10.4.4.9>
- Roy J, Saha S. 2019. GIS-based gully erosion susceptibility evaluation using frequency ratio, cosine amplitude and logistic regression ensembled with Fuzzy logic in Hinglo River Basin, India, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100247>
- Saber chenari K, Bahremand A, Sheikh VB, Komaki CB. 2016. Gully erosion hazard zoning using of Dempster-Shafer Model in the Gharnaveh Watershed, Golestan Province, Iranian Journal of Ecohydrology, 3(2): 219-231. <https://doi.org/10.22059/ije.2016.59663>
- Saeediyani H, shirani K, salajegheh A, ahmadi R. 2023. Investigating the performance of the entropy maximum model in determining the importance of effective environmental factors in creating gully erosion in semi-arid areas. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 2(1): 129-144. <https://doi.org/10.22034/nawee.2023.407297.1047>
- Shadfar S. 2015. Determination of gully erosion potential using artificial neural network, case study: Turud watershed. *Watershed Engineering and Management*, 8(3): 256-263. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2016.106809>
- Shahrivar A, Shadfar S, Khazaei M, Adeli B. 2016. Evaluation of trench erosion zoning methods (Case study: Abgandi Watershed). *Ecohydrology*, 4(1): 119-132. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/IJE.2017.60893>
- Shi Q, Wang W, Guo M, Chen Z, Feng L, Zhao M, Xiao H. 2020. The impact of flow discharge on the hydraulic characteristics of headcut erosion processes in the gully region of the Loess Plateau. *Hydrological Processes*, 34(3): 718-729. <https://doi.org/10.1002/hyp.13620>

- Shit PK, Bhunia GS, Pourghasemi HR. 2020. Gully erosion susceptibility mapping based on bayesian weight of evidence. *Gully Erosion Studies from India and Surrounding Regions*, 94(35):133-146. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23243-68>
- Shirani K. 2020. Gully erosion mapping and susceptibility assessment using statistical and probabilistic methods. *Journal of Water and Soil Sciences*, 25 (2):151-174. <https://doi.org/10.47176/jwss.25.2.147215>
- Soleimani F, Kalehhouei M, Lotfollazadeh D. 2023. Study of the morphological characteristics of gullies in Khuzestan Province. *Watershed Management Research Journal*, 36(3): 23-41. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/wmrj.2023.360375.1497>
- Soleimanpour SM, Pourghasemi HR, Zare M. 2021. A comparative assessment of gully erosion spatial predictive modeling using statistical and machine learning models. *Catena*, 207(43): 342-361. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105679>
- Sufi M, Issai H, Davoudi Rad AA, Zanjani Jam M, Shadfar S, Niknam M. and Nowrozi Kh. 2017. Investigation of the threshold of watershed erosion slope in Iran, phase 1: Fars, Golestan, Markazi and Zanjan Provinces, Research Project, Soil Conservation and Watershed Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organizations, 83 p. (In Persian).
- Sun L, Liu YF, Wang X, Liu Y, Wu GL. 2022. Soil nutrient loss by gully erosion on sloping Alpine steppe in the Northern Qinghai-Tibetan Plateau. *Catena*, 218(26):184-208. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105763>
- Tadesual A, Setargie M, Ebabu K, Nzioki B, Meshesha TM. 2023. Random Forest-based gully erosion susceptibility assessment across different agro-ecologies of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Geomorphology*, 431(14):241-263. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108671>
- Tahmasabipour N, Rahmati A, Qurbani Nejad S. 2015. Prediction of susceptibility to gully erosion in Simera region based on the certainty factor model and determination of the importance of factors affecting it, *Ecohydrology*, 1(3): 83-93. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/IJE.2016.59192>
- Yang S, Guan Y, Zhao C, Zhang C, Bai J, Chen K. 2019. Determining the influence of catchment area on intensity of gully erosion using high-resolution aerial imagery: A 40-year case study from the Loess Plateau, northern China, *Geoderma*, 347(83):90-102. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.042>
- Yousefi Mobarhan E, Shirani K. 2023. Assessment of maximum entropy (ME) to identify effective factors on gully erosion and determination of sensitive Areas in Alaa Semnan Watershed. *Journal of Watershed Management Research*.-14(28): 37-54. <https://doi.org/10.61186/jwmr.14.28.37>
- Zakerinejad R, Alvandi P. 2023. Spatial prediction of gully erosion using TanDEM-X data and Maximum Entropy Model (A case study: Khasoyeh Watershed, in Southeast of Fars Province). *Environmental Erosion Research Journal*, 3(1):96-113. <https://doi.org/10.122517812.1402.13.1.4.6>



Evaluation of gully erosion using weight of evidence (WofE) and Dempster-Schiffer (DSH) models in Ilam watershed

Shamsolah Asgari^{*1}, Kourosh Shirani², Faridoon Slimani³

1 and 3- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Ilam Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ilam, Iran
2- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

In general, the modeling process for any phenomenon or dependent variable using effective environmental factors as independent variables can be generalized to the future in addition to determining the status of current conditions. Therefore, the basic assumption in all environmental modeling is based on the principle of uniformity or uniformitarianism, which can be generalized for the subject of this research, and topographic metrics are one of the main factors in the creation and expansion of gully erosion. This research was conducted with the aim of determining the accuracy of water erosion susceptibility maps based on Wight of Evidence and Dempster-Schiffer weight models using relative operator or receiver characteristic curve (AUC and ROC). Also, the thresholds of effective factors (including low-elevation indices and considered environmental factors) on the occurrence of gully erosion in Ilam watershed were determined.

Materials and Methods

The Ilam watershed is in Ilam province in the southwest of Iran. In this research, Dempster-Shiffer and maximum weight models were used to determine the thresholds and zoning of gully erosion sensitivity. This research was done in seven main steps. In the first step, the research area was selected and the flood event distribution map (dependent variable) was prepared, and the data were randomly

Article Type: Research Article

*Corresponding Author E-mail: shamsasgari@yahoo.com

Citation: Asgari, SH., Shirani, K., Slimani, F. 2025. Evaluation of gully erosion using weight of evidence (WofE) and Dempster-Schiffer (DSH) models in Ilam watershed. *Watershed Management Research*. 37 (4):71-98.

DOI: 10.22092/wmrj.2024.364768.1571

Received: 23 January 2024, **Received in revised form:** 20 July 2024, **Accepted:** 19 September 2024

Published online: 01 January 2025

Watershed Management Research, VOL.37, No.4, Ser. No: 145, Winter 2025, pp.71-98.

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



divided into two training or calibration groups (70%) and experimental or prediction groups (30%). In the second step, maps of 22 effective factors (independent variables) were prepared. In the third step, the effective factors were selected using the alignment test between the effective factors and the occurrence of floods. In the fourth step, Wight of Evidence and Dempster-Schiffer weight models were implemented and zoning maps were prepared. In the fifth step of validation, evaluation, comparison of zoning maps and prediction of sensitivity obtained from the mentioned models were done in two stages of recalibration and prediction. In the sixth step, thresholds and importance of effective factors were determined based on the best model. In the seventh step, the zoning map and prediction of sensitivity to the erosion event of gully was prepared.

Results and Discussion

In this research, after field surveys, interpretation of aerial photographs and processing of satellite images, 331 gullies were identified and investigated. The distribution map of gully erosion has been prepared and digitized for 331 gullies, of which 70% of the gullies were used to train Wight of Evidence and Dempstershafer models, which includes 232 gullies. The remaining 30%, which includes 99 gullies, was used to validate the models from the characteristic curve of the ROC system and the surface area under the AUC diagram. First, the data obtained from the gully erosion zoning maps were fitted separately to the points of 99 gullies and 232 gullies using both Wight of Evidence and Dempster Shaffer models, and after transferring the data to the data excel file were analyzed in SPSS software. According to obtained from calibration points (30%), both models had an acceptable percentage of the area under the curve, which indicates the high performance of both models in the region.

Conclusion and Suggestions

Accurate field identification of gully erosion points using GPS device was one of the results obtained from this research. As a result, the erosion distribution map of 331 gullies was prepared and it was checked and recorded for the first time in the researched watershed. One of the advantages and innovations of this research was the use of Alus satellite images and GIS and Saga GIS software. The results showed that the most effective independent variables were extracted on the dependent variable of watershed erosion in the watershed system and 22 grid layers were prepared. Finally, the results of the statistical analysis provide a ranking table of the most important indicators in creating gully erosion in the region, which is the land use index of 37.1%, waterway density with 17.7%, lithology with 13.2%, climate with 9.4%, precipitation 3 5.5% and NDVI with 3.5% and other indicators respectively affect the erosion, respectively of the gully. The results of this research can be promoted and taught, and executive bodies can use the results of this research to take necessary measures to control the gully erosion.

Key Words: Ilam watershed, Gully erosion threshold, Dempster Shaffer model, Wight of Evidence model



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مادان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی

ارزیابی نقش خصوصیات بارش و آتش‌سوزی تجویزی بر اندازه رواناب و آبشویی عناصر مغذی خاک در پارک جنگلی چغاسبز ایلام

طاهره ارغند^۱، نورالدین رستمی^{۲*}، مهدی حیدری^۳، مرتضی قیصوری^۴

۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت و کنترل بیابان، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایران

۲ - دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایران

۳ - استاد گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایران

۴ - دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

خاک یکی از اجزای مهم زمین، با عملکردها و خدمات پرشمار بوم‌سازگانی است که برای حیات پایدار در کره زمین ضروری است. با از بین رفتن خاک سطح زمین بر اثر فرسایش، در سراسر جهان، توان تولیدی خاک بوم‌سازگان‌های طبیعی از جمله جنگل‌ها و مراتع و زمین‌های کشاورزی کاهش می‌یابد. این پژوهش با هدف بررسی نقش مدت بارش و آتش‌سوزی تجویزی بر تولید رواناب و عناصر مغذی خاک زیراشکوب گونه‌های گوناگون درختی در پارک جنگلی چغاسبز، استان ایلام انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش اندازه رواناب، رسوب و عناصر مغذی موجود در رواناب در توده‌های جنگل کاری‌شده با سرو زربین (*Cupressus sempervirens* L)، جنگل طبیعی بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl) و قطعه شاهد (خارج از تاج‌پوشش اشکوب فوقانی) در دو وضعیت آتش‌سوزی تجویزی و بدون آتش‌سوزی با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران در مدت‌های بارش ۱۵ و ۳۰ دقیقه با شدت ثابت ۸۰ میلی‌متر در ساعت اندازه‌گیری شد. در این

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: n.rostami@ilam.ac.ir

استناد: ارغند، ط، رستمی، ن، حیدری، م، قیصوری، م. ۱۴۰۳. ارزیابی نقش خصوصیات بارش و آتش‌سوزی تجویزی بر اندازه رواناب و آبشویی عناصر مغذی خاک در پارک جنگلی چغاسبز ایلام. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۷ (۴): ۹۹-۱۱۸.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2024.364885.1575

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۳، دوره ۳۷، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۴۵، زمستان ۱۴۰۳، صفحه‌های ۹۹ تا ۱۱۸.

© نویسندگان

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



پژوهش اثر نوع گونه بر اندازه رواناب، رسوب و عناصر مغذی بررسی شد. همچنین، خصوصیات اصلی خاک شامل بافت خاک، ضخامت لاشبرگ، اسیدیته خاک اندازه‌گیری شد. برای بررسی تفاوت متغیرهای بررسی‌شده میان گونه‌های مطالعه‌شده از تجزیهٔ پراکنش یک‌طرفه استفاده شد و مقایسهٔ میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج بررسی رواناب در قطعه‌های آزمایشی تیمار آتش‌سوزی تجویزی و مقایسهٔ گونه‌های مطالعه‌شده در بازه‌های زمانی، نشان داد که در بازه‌های گوناگون، آتش‌سوزی باعث افزایش اندازهٔ رواناب شد به‌طوری که در مدت بازهٔ ۳۰ دقیقه در قطعهٔ شاهد رواناب با اندازهٔ ۱۷ لیتر تولید شد که این اندازه رواناب در مقایسه با دو تودهٔ سرو و بلوط افزایش معنی‌داری داشت.

همچنین، بیشترین اندازهٔ رسوب کل در بازهٔ زمانی ۳۰ دقیقه در قطعهٔ شاهد ۱۰۸/۱۵ گرم بود و کمترین اندازهٔ آن در بازهٔ زمانی ۱۵ دقیقه در تودهٔ سرو زرین ۵۲/۶۴ گرم بود. از سوی دیگر، در تیمار بدون آتش‌سوزی مشخص شد که بیش‌ترین اندازهٔ رواناب در منطقهٔ مطالعه‌شده به‌ترتیب در بازهٔ زمانی ۱۵ و ۳۰ دقیقه در قطعهٔ شاهد با اندازهٔ ۵ و ۱۷ لیتر بود. بررسی همزمان رواناب و رسوب قطعه‌های آزمایشی نشان داد که روند هر دو مشابه بود و با افزایش رواناب، رسوب نیز افزایش یافت.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس نتایج این پژوهش مشخص شد که تغییر در عرصه‌های طبیعی زاگرس مانند آتش‌سوزی می‌تواند فرایند تولید رواناب را افزایش دهد و باعث هدررفت عناصر مغذی موجود در خاک و تغییر خصوصیات شیمیایی خاک شود. پیشنهاد می‌شود، اثر افزودن مواد آلی اصلاح‌کننده یا پوشش‌دهندهٔ خاک بر خصوصیات خاک، رواناب و رسوب پس از آتش‌سوزی بررسی و شبیه‌سازی شود.

واژگان کلیدی: آتش‌سوزی، شبیه‌ساز باران، مواد مغذی خاک، ضریب رواناب، هدررفت خاک

مقدمه

(۲۰۱۱)؛ و با توجه به اینکه افق سطحی خاک اغلب با اندازهٔ مشخصی از مواد آلی باعث بهبود نفوذ و افزایش ظرفیت نگهداری آب می‌شود، هدررفت آن نیز به عامل‌هایی مانند بافت، ساختمان، اندازهٔ مواد آلی و نفوذپذیری نیم‌رخ خاک بستگی دارد.

از بین این عامل، مواد آلی نقشی مؤثری بر پایداری خاکدانه‌ها و نفوذپذیری خاک دارند (واعظی ۲۰۰۵). با این حال راه‌کارهای پرشماری به‌منظور افزایش نفوذپذیری خاک و کاهش رواناب سطحی پیشنهاد و اجرا شده است (آدمی و خالدی‌درویشیان ۲۰۲۲). افزودن مادهٔ آلی به خاک تأثیر عمده‌ای در افزایش تولید محصول دارد و تأثیر مستقیمی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارد (سلیمانی و آزموده ۲۰۱۱؛ استیونسون ۱۹۹۴؛ آنون ۱۹۸۲). مادهٔ آلی خاک مانع از فروپاشی خاکدانه (عمادی و همکاران ۲۰۰۹)، کاهش فرسایش‌پذیری خاک (سلیک ۲۰۰۵)، بهبود ساختمان خاک و جلوگیری از تشکیل سله و بسیاری از عامل‌های دیگر خواهد شد (کاسترو و همکاران ۲۰۰۲) و با جذب رطوبت بیشتر و تقویت پوشش گیاهی از جاری شدن آب بر سطح زمین جلوگیری می‌کند (جونز و همکاران ۲۰۱۴).

پوشش گیاهی و به‌ویژه جنگل‌های طبیعی و جنگل‌کاری‌ها

خاک یکی از اجزای مهم زمین، با عملکردها و خدمات بوم‌سازگان پرشماری است که برای حیات پایدار در کرهٔ زمین ضروری است (رستمی و ربانی ۲۰۲۳). نابودی خاک بیانگر کاهش ظرفیت آن برای پشتیبانی از عملکردها و خدمات بوم‌سازگان است که ناشی از فرسایش تشدید، شور شدن، برهم خوردن تعادل عناصر مغذی، اسیدی شدن، کاهش کربن آلی و کاهش تنوع زیستی آن است (لال ۲۰۱۲). با از بین رفتن خاک سطح زمین بر اثر فرسایش، در سراسر جهان، توان تولیدی بوم‌سازگان‌های طبیعی از جمله جنگل‌ها و مراتع و زمین‌های کشاورزی را کاهش می‌یابد (سامونیل و همکاران ۲۰۲۲)؛ کاستریدیس و همکاران (۲۰۲۲) و این موضوع یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی در جهان هرساله خسارت‌های زیادی به‌وجود می‌آورد (لی و همکاران ۲۰۰۷). برای میانگین فرسایش خاک در ایران، اعداد متفاوتی از ۵/۵ (عرب‌خدری و همکاران ۲۰۱۸) تا ۲۴ (محمدی و همکاران ۲۰۱۸) تن در هکتار در سال گزارش شده است.

از اثرات مهم فرسایش خاک، هدررفت عناصر مغذی خاک و کاهش حاصل‌خیزی آن است (نیکجو وکیل‌آباد و همکاران ۲۰۲۳). از طرف دیگر، فرسایش خاک نقش بارزی در هدررفت مادهٔ آلی از سطح آبخیزها دارد (نور و میرنیا

یکی از عامل‌های مهم مهار رواناب و رسوب به‌شمار می‌آیند. پوشش گیاهی با کاهش فرسایش خاک به‌واسطهٔ ربایش قطرات باران و کاهش انرژی جنبشی آن به‌وسیلهٔ تاج‌پوشش، اصلاح خاک با افزودن مادهٔ آلی و لاشبرگ به خاک زیراشکوب، موجب حفاظت خاک می‌شود (کاسرمیرو و همکاران ۲۰۰۴). از این‌رو، در زمینی که پوشش گیاهی مناسب وجود داشته باشد، حتی باوجود بارندگی شدید و شیب تند، شدت فرسایش کاهش خواهد یافت (رفاهی ۲۰۰۶). به‌طور کلی، امروزه فرسایش خاک و پیامدهای ناشی از آن از جمله بیابان‌زایی (نور و همکاران ۲۰۲۳) یکی از مهم‌ترین چالش‌های مدیریتی در زمینهٔ حفظ منابع آب و خاک است. از این‌رو، نیاز است این مسئله به‌شکل کمی بررسی شود (مقدمی‌راد و همکاران ۲۰۱۸). در پژوهشی، جانائو و همکاران (۲۰۱۴) کربن آلی محلول و مواد مغذی خارج‌شده از زمین‌های شیب‌دار در کاربری‌های گوناگون را اندازه‌گیری کردند و نشان دادند کمترین و بیشترین اندازهٔ کربن آلی محلول، در یک بارش ۴۰ دقیقه‌ای به‌ترتیب در زمین‌های لخت و زمین‌های جنگل کاری بدون لاشبرگ مشاهده شد.

در آبخیز کچیک در استان گلستان، عباسی و همکاران (۲۰۱۷) در پنج کاربری زمین در چهار طبقه شیب و قطعه‌های ۴ مترمربعی رواناب و رسوب را جمع‌آوری و اندازه‌گیری کردند و نشان دادند که به‌ترتیب مادهٔ آلی، فسفر و ظرفیت تبادل کاتیونی بیشترین تأثیر را در اندازهٔ رواناب و رسوب داشت. از سوی دیگر، با توجه به نقش پوشش گیاهی در کاهش رواناب و رسوب، مدیریت صحیح و اصلاح کاربری زمین در کاهش اثرات منفی آن‌ها تأثیر زیادی داشت. آلکانیز و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی اثرات کوتاه‌مدت و بلندمدت آتش‌سوزی‌های تجویز شده بر خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، چکیده‌ای از مزایا و معایب این فن را در راستای اینکه آیا آتش‌سوزی‌های تجویز شده می‌تواند برای مدیریت مفید باشند یا خیر، گزارش کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که آتش‌سوزی‌های تجویز شده بر ویژگی‌های خاک تأثیرگذار بود اما، اندازهٔ اثر آن با توجه به ویژگی‌های اولیهٔ خاک، پوشش گیاهی یا نوع آتش‌سوزی بسیار متفاوت بود. در آبخیز کاکاشرف در استان لرستان، بهرهمی و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر کاربری زمین‌ها و طبقات شیب بر هدررفت فسفر و پتاسیم در رواناب تولیدشده را بررسی کردند و اندازهٔ تلفات عناصر فسفر و پتاسیم ناشی از هر بارش در سه کاربری و سه شیب را اندازه‌گیری کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که میانگین هدررفت فسفر در رواناب کاربری مرتع بیشترین و در کاربری زراعت کم‌ترین بود. همچنین اثر شیب بر هدررفت فسفر در کاربری جنگل در سطح ۱٪ و زراعت در سطح ۵٪ معنی‌دار بود ولی در کاربری مرتع معنی‌دار نشد و اثر شیب بر هدررفت پتاسیم

فقط در کاربری زراعت معنی‌دار شد. در پژوهشی، ژائو و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران، اثر شدت بارش و پوشش گیاهی بر فرسایش را بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که پوشش گیاهی هدررفت خاک را در قطعهٔ آزمایشی مهار کرد و تا ۸۸ تا ۹۹٪ اندازه آن را کاهش داد. همچنین، شدت بارش با تأثیر بر حجم رواناب در مهار اندازهٔ هدررفت خاک مؤثر است. در هند سینگ و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر آتش‌سوزی‌های جنگل کاج و بلوط را بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک و فعالیت آنزیمی بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که زیست‌تودهٔ میکروبی کربن و نیتروژن پایه در خاک در هر دو جنگل کاهش یافت در حالی که فعالیت دهیدروناژ در مکان‌های سوخته در هر دو نوع جنگل افزایش یافت. تغییر کلی کربن زیست‌توده میکروبی خاک در جنگل‌های سوختهٔ بلوط و کاج به‌ترتیب ۶۳ و ۴۰٪ بود. در منطقهٔ کجور، فرهادی‌فر و همکاران (۲۰۲۱) عناصر مغذی -C، N، Ca، Mg، K و P در لاشبرگ و انباشتگی آن‌ها در خاک را در رویشگاه مرتعی با گونهٔ غالب *Stachys byzantina* K. Koch. و *Rhamnus pallasii* Fisch. and C.A.Mey و رویشگاه جنگلی با گونهٔ غالب بلوط (*Quercus castaneifolia* C.A. Mey.) اندازه‌گیری کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین اندازه‌های کربن آلی و نیتروژن کل لاشبرگ به‌ترتیب ۸۴/۵۲ و ۲/۹۷٪ بود که در رویشگاه مرتعی با پوشش *Rh. pallasii* به‌دست آمد. بیشترین اندازهٔ کلسیم و منیزیم قابل جذب به‌ترتیب ۰/۷٪ و ۲۹۱/۴٪ بود که در لاشبرگ رویشگاه جنگلی مشاهده شد. همچنین، بیشترین اندازهٔ پتاسیم و فسفر قابل جذب به‌ترتیب ۱/۳۶ و ۰/۱۴۹٪ بود که در لاشبرگ رویشگاه مرتعی با پوشش *St. byzantina* به‌دست آمد. در جنگل‌های زاگرس، رستمی و همکاران (۲۰۲۲) اندازهٔ رواناب و تلفات خاک پس از آتش‌سوزی را در دو کاربری جنگل (بلوط و کاج) و زمین‌های زراعی با شرایط شبیه‌سازی باران ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد رواناب و فرسایش ناشی از آتش‌سوزی به‌شکل محسوس در زمین‌های جنگلی تا ۹۵٪ افزایش یافت. کاهش کیفیت و سلامت خاک به‌دلیل نبودن مدیریت مناسب زمین و یا تغییر در کاربری زمین‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران به یک چالش اساسی تبدیل شده است و بر عناصر مغذی خاک نیز تأثیرگذار است (جوادی و همکاران ۲۰۲۰؛ حیدری و همکاران ۲۰۲۰؛ اسحاقی‌راد و همکاران ۲۰۱۱). در آبخیز زرین‌آباد ساری، فدایی و همکاران (۲۰۲۲) اثرات آتش‌سوزی بر ویژگی‌های کیفی خاک در یک منطقه جنگلی معرف در جنگل‌های هیرکانی را بررسی کردند. به این منظور، این پژوهشگران چهار مکان مختلف شامل جنگل‌های نسوختهٔ طبیعی، جنگل‌های سوختهٔ

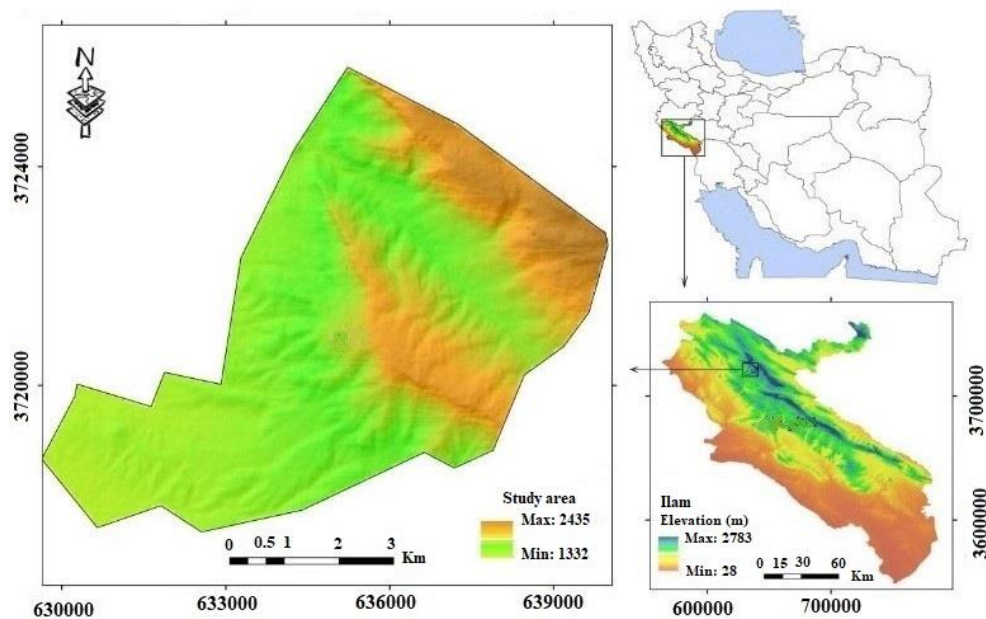
طبیعی، مزارع نسوخته و مزرعه سوخته انتخاب کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که درصد شن، لای، پایداری خاکدانه، آب‌گریزی خاک، کربن آلی، مواد آلی، نیتروژن کل خاک، پتاسیم و فسفر قابل جذب، هدایت الکتریکی و pH در هنگام سوزاندن سطح خاک، به‌طور معنی‌داری افزایش یافت؛ اما درصد رس، نفوذ اولیه، نهایی و متوسط در مناطق سوخته در مقایسه با دیگر وضعیت‌های جنگلی روند کاهشی داشت. افزون بر این، هیچ اثر معنی‌داری بر جرم مخصوص حقیقی و ظاهری، تخلخل و رطوبت خاک مشاهده نشد. در مراتع و بوته‌زارهای کامیاران، اخزری و همکاران (۲۰۲۲) اثرات آتش‌سوزی بر برخی از ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی مرتع بررسی کردند. در این پژوهش، pH خاک، هدایت الکتریکی، پتاسیم، کلسیم، محتوای سدیم و منیزیم به‌عنوان ویژگی‌های خاک و تنوع و تراکم (درصد پوشش زمین) به‌عنوان ویژگی‌های پوشش گیاهی ارزیابی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که پس از آتش‌سوزی کاهش معنی‌داری در تنوع گونه‌ای مشاهده شد. در پژوهشی، کله‌هویی و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران اثر باران همراه با باد از باد بر فرسایش‌های پاشمانی و میان‌شیاری در شرایط آزمایشگاهی را با شدت بارندگی ۵۰ میلی‌متر در ساعت با مهار بدون باد و در دو سرعت باد را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که باد بر تولید رواناب و اجزای فرسایش خاک تأثیر قابل‌توجهی داشت. به‌طوری‌که فرسایش خاک در شرایط باران همراه با باد در مقایسه با شرایط بدون باد بیشتر بود.

به‌طور کلی، نتایج پژوهش‌ها بیانگر آن است که یک خلأ پژوهشی در زمینه بررسی اثر مدت بارش و آتش‌سوزی بر اندازه رواناب، رسوب و هدررفت عناصر مغذی خاک در جنگل‌های طبیعی و دست‌کاشت در منطقه زاگرس وجود دارد. از این‌رو، این پژوهش در یک منطقه با ظرفیت بالقوه رخداد آتش‌سوزی بر اساس آتش‌سوزی تجویزی، اجرا شد. مناطق جنگل‌کاری‌شده و جنگل طبیعی بررسی‌شده در این پژوهش از نظر رواناب و رسوب در قبل و بعد از آتش‌سوزی تجویزی مقایسه شدند. منطقه مطالعه‌شده در زاگرس به‌دلیل وجود عامل‌های گوناگون مانند تغییر کاربری زمین‌ها، چرای دام و قطع درختان برای مصارف

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

شهر ایلام در شمال‌شرق استان ایلام با مساحت ۱۱۹ کیلومترمربع و میانگین بلندی ۱۴۰۱ متر از سطح دریا در میان رشته‌کوه‌های زاگرس است؛ در این منطقه بلندی‌هایی در شرق، غرب و شمال وجود دارد. تفاوت دما و بارندگی در بخش‌های شمالی، آب و هوای نسبتاً سرد و زمستان طولانی با میانگین سالانه بارندگی ۵۷۷ میلی‌متر و میانگین دمای ۱۷ درجه از دیگر ویژگی‌های منطقه نامبرده است (اداره هواشناسی شهر ایلام ۲۰۲۳). پوشش غالب جنگلی این منطقه درختان بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl) است. در دهه‌های گذشته جنگل‌کاری‌هایی با درختان بومی و غیربومی مانند سرو زربین (*Cupressus sempervirens* L.) در برخی از قسمت‌های این منطقه از جمله در پارک جنگلی چغاسبز و برخی مناطق دیگر زاگرس انجام‌شده است؛ که بیشتر به‌منظور توسعه فضای سبز و افزایش تاج‌پوشش مناطق تخریب‌یافته بوده است. موقعیت منطقه مطالعه‌شده در شکل ۱ نشان‌داده شده است.



شکل ۱- مشخصات جغرافیایی منطقه مطالعه شده.

Fig 1- Geographical characteristics of the study area.

است و یک نمونه شبیه ساز باران کاربردی و قابل حمل برای انجام بررسی های میدانی برای مساحتی با ابعاد ۱×۲ متر است. در این دستگاه با استفاده از روش عکس برداری، در فشار بهینه ۸۰ کیلو پاسکال، سرعت سقوط قطرات باران ۷/۱ متر در ثانیه و دامنه قطری قطرات باران شبیه سازی شده از ۰/۴ تا ۴/۴ میلی متر محاسبه شده است (شیخ و همکاران ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷). این دستگاه کاربردهای گوناگونی دارد که از جمله می توان به مطالعه نقش حفاظتی انواع پوشش گیاهی و مطالعه هدررفت مواد مغذی خاک اشاره کرد که از اهداف اصلی این پژوهش بود. بر اساس هدف پژوهش در هر کدام از تیمارها، اثر مدت بارش (۱۵ و ۳۰ دقیقه) و نوع گونه درختی بر اندازه رواناب، رسوب و عناصر مغذی موجود در رواناب بررسی شد. همچنین، خصوصیات اصلی شامل بافت خاک، ضخامت لاشبرگ، اسیدیته خاک اندازه گیری شد. مشخصات وضعیت پوشش گیاهی منطقه در جدول ۱ آورده شده است.

روش پژوهش

در این پژوهش برای اندازه گیری اندازه آبخویی سه تیمار اصلی شامل توده های جنگل کاری شده با سرو زربین (*Cupressus sempervirens* L.)، جنگل طبیعی بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.) و خارج از تاج پوشش توده های جنگلی (شاهد)، دو تیمار فرعی با و بدون آتش سوزی تجویزی در سه تکرار در نظر گرفته شد. سپس از دستگاه شبیه ساز باران در مدت های بارش ۱۵ و ۳۰ دقیقه (تیمار فرعی دوم) و با شدت بارش ۸۰ میلی متر در ساعت (بر اساس داده های بارش بلندمدت منطقه و منحنی های شدت-مدت-فراوانی) در یک قطعه ۲ مترمربعی در بهار ۱۴۰۱ برای بررسی رواناب و رسوب استفاده شد (شکل های ۲ و ۳). دستگاه پرتابل شبیه ساز باران که در این پژوهش استفاده شد به وسیله دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان ساخته شده است. این دستگاه به منظور بررسی فرایندهای بارش-رواناب و فرسایش-رسوب در کاربری های گوناگون طراحی شده

جدول ۱- مشخصات توده‌های جنگلی و دست کاشت مطالعه‌شده.

Table 1- Characteristics of the studied forest stands and plantations.

Stand Characteristics	Land Use	Row
Coppice stand, understory vegetation including annual and perennial grasses and forbs, average DBH of trees 10-15 cm, litter depth 2-3 cm, canopy cover 20-30%.	Natural forest: Oak (<i>Quercus brantii</i>)	1
The litter depth 1-1.5 cm, the canopy cover is 60-70%, average DBH 35-40 cm.	Plantation: <i>Cupressus sempervirens</i> L.	2



شکل ۲- مراحل شبیه‌سازی باران در تیمار بدون آتش‌سوزی.

Fig 2- Rainfall simulation steps in unburned treatment.



شکل ۳- مراحل شبیه‌سازی باران در تیمار با آتش‌سوزی.

Figure 3- Rainfall simulation steps in burned treatment.

اندازه کربنات کلسیم با روش جکسون (۱۹۶۷) تعیین شد. اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی خاک با استفاده از روش‌های متداول و استاندارد (ASTM، ۲۰۰۴) انجام شد. همچنین، اندازه ذرات با محاسبه اندازه جرم خاکدانه‌های عبور کرده از دسته الک‌های با اندازه الک ۵

سپس در آزمایشگاه خاک، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک که بر فرایند فرسایش تأثیرگذار هستند؛ اندازه‌گیری شدند. این خصوصیات شامل Ca ، Mg ، Na ، K ، EC ، pH ، نسبت جذبی سدیم، آهک، درصد سنگ‌ریزه، بافت خاک، دانه‌بندی، لای، رس، شن بودند.

SPSS و Excel تحلیل شدند. همچنین، برای بررسی بهنجار بودن و همگنی داده‌ها از آزمون کولموگروف اسمیرنوف و آزمون لون استفاده شد. به منظور بررسی اثر گونه بر متغیرهای وابسته از تجزیه پراکنش یک‌طرفه و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده شد.

نتایج

نتایج برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک (بافت خاک، درصد رس، لای، شن، درصد کربن آلی، pH، EC و کربنات کلسیم) و نتایج تجزیه پراکنش خاک در جدول ۲ آورده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده میان سنجه‌های pH و درصد رس در تیمارهای مطالعه شده تفاوت معنی داری (در سطح ۰.۵٪) بود. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که pH خاک توده سرو در مقایسه با توده بلوط و شاهد کمتر بود. همچنین اندازه درصد رس خاک در توده بلوط و سرو در مقایسه با منطقه شاهد به طور معنی داری بیشتر بود (جدول ۳).

مش (۴ میلی متر) تا الک ۲۷۰ مش (۰/۰۵۳ میلی متر) در آزمایشگاه خاکشناسی محاسبه شد. با استفاده از داده‌های به دست آمده از تحلیل الک‌ها، منحنی‌های دانه بندی رسم شد. به منظور تعیین درصد حجمی سنگریزه در هر نمونه خاک، حجم معینی از هر نمونه از الک ۲ میلی متری عبور داده شد و درصد حجمی سنگریزه محاسبه شد (مورگان و همکاران ۱۹۹۸). اندازه گیری بخش‌های دانه ریز خاک مانند لای، رس و ماسه خیلی ریز با روش چگالی سنجی انجام شد. در این روش ذرات خاک معلق در آب با گذشت زمان به تدریج رسوب می کنند و جرم مخصوص مایع (گرم در لیتر) کاهش می یابد. از این رو، اندازه کاهش جرم مخصوص، مبنای محاسبه اندازه ذرات معلق در آب است.

تجزیه و تحلیل آماری

داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های تعیین حجم نمونه‌های رواناب، وزن رسوب، عناصر مغذی موجود در رواناب و خصوصیات مربوط به خاک، با استفاده از نرم افزار

جدول ۲- تجزیه پراکنش گیاهی بر خصوصیات خاک در منطقه بدون آتش سوزی.

Table 2- The result of analysis variance for the effect of vegetation types on soil properties in unburnt treatment.

Sig.value	f	df	Variable
0.014*	9.53	2	pH
0.122	3.05	2	EC
0.179	2.31	2	OC %
0.103	3.39	2	CaCo3 %
0.23	7.53	2	Sand %
0.066	4.41	2	Silt %
0.014*	9.37	2	Clay %
0.152	2.62	2	K (ppm)
0.344	1.28	2	P (ppm)

*Significance of differences at 5%

*معنی داری تفاوت‌ها در سطح ۰.۵٪

جدول ۳- مقایسه میانگین خصوصیات خاک در سه تیمار مطالعه شده.

Table 3- The mean comparison of soil properties in the three treatments.

Control	<i>Cupressus sempervirens</i> L.	<i>Quercus brantii</i> Lindl	Characrestics
7.46±0.74 ^a	7.07±0.74 ^b	7.31±0.74 ^a	pH
17.33±0.74 ^b	20.66±0.74 ^{ab}	24.00±0.74 ^a	Clay %

رواناب، ضریب رواناب و رسوب در سطح یک درصد معنی دار بود (جدول ۴). با توجه به تیمارهای آزمایشی در منطقه مطالعه شده، نقش انواع عامل‌ها بر اندازه رواناب و رسوب ارزیابی شد. بر اساس این نتایج بیشترین اندازه

اثر نوع پوشش بر اندازه رواناب و رسوب در مناطق با آتش سوزی و بدون آتش سوزی در بازه زمانی ۱۵ و ۳۰ دقیقه نتایج تجزیه پراکنش یک طرفه نشان داد که اثر تیمارهای آزمایشی در مناطق بدون آتش سوزی بر هر سه سنج

در منطقه بدون آتش‌سوزی مشاهده شد که بیشترین اندازه رواناب در دو بازه زمانی ۱۵ دقیقه و ۳۰ دقیقه مربوط به تیمار شاهد با اندازه $۵۳۶۳/۳۳ \pm ۴۶۲/۷۴$ و $۱۷۳۷۳/۳۳ \pm ۴۷۷/۱۸$ سی سی بود و بعد از آن توده بلوط در بازه زمانی ۳۰ دقیقه بود (شکل ۴).

رواناب و رسوب در قطعه‌های بدون آتش‌سوزی به ترتیب در بازه زمانی ۳۰ و ۱۵ دقیقه مربوط به تیمار شاهد بود. همچنین، روند میان رواناب و رسوب خروجی از قطعه‌های فرسایشی مشابه بود، به‌طوری که با افزایش رواناب، رسوب نیز افزایش یافت. با بررسی اندازه رواناب

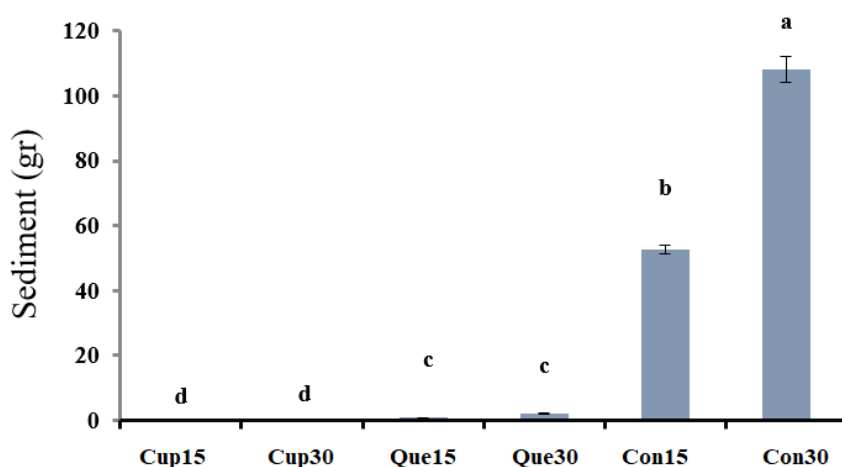
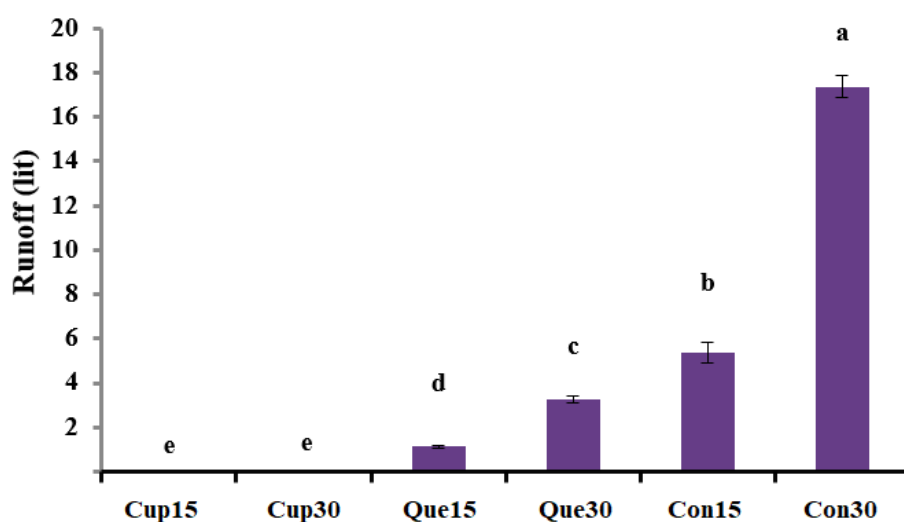
جدول ۴- تجزیه پراکنش اثر نوع پوشش بر رواناب، ضریب رواناب و رسوب در تیمار بدون آتش‌سوزی.

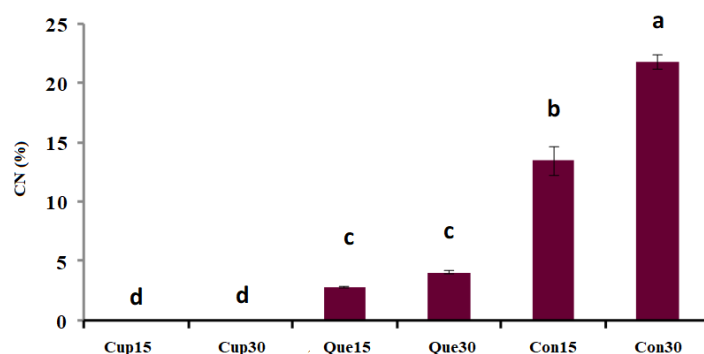
Table 2- The result of analysis variance for the effect of vegetation types on runoff, runoff coefficient and sediment in unburnt treatment.

Sig.value	f	df	Variable
0.000*	568.22	5	Runoff
0.000 *	263.20	5	Sediment
0.000*	692.82	5	CN

Significance of differences at 1%

*معنی‌داری تفاوت‌ها در سطح ۱٪





شکل ۴- مقایسه میانگین اندازه رواناب، رسوب و ضریب رواناب میان انواع گوناگون پوشش گیاهی در تیمار بدون آتش‌سوزی (Cup=سروزربین، Que=بلوط ایرانی، Con=شاهد).

Figure 4-The mean comparison of runoff, runoff coefficient and sediment between different vegetation types in unburnt treatment (Cup=Cupressus sempervirens, Que=Quercus brantii Lindl, Con=Control).

کمترین اندازه آن مربوط به گونه سوزنی‌برگ سرو زرین در بازه زمانی ۱۵ دقیقه بود. نتایج نشان داد که پس از آتش‌سوزی اندازه رسوب در همه قطعه‌های مستقر در توده‌های سرو زرین و بلوط افزایش یافت. با بررسی ضریب رواناب در تیمار با آتش‌سوزی مشخص شد که بیشترین درصد ضریب رواناب به ترتیب مربوط به تیمار شاهد (۵۹۷/۲۱/۷۱±۰/۲۱٪) در بازه زمانی ۳۰ دقیقه، تیمار شاهد (۱۱۵/۱۳/۴۰±۰/۱۳٪) در بازه زمانی ۱۵ دقیقه و گونه‌های بلوط در بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه (۲۱۹/۹/۶۱±۰/۹/۶۱٪) و ۱۵ دقیقه (۴۸۷/۶/۹۱±۰/۶/۹۱٪) بود. همچنین، کمترین درصد ضریب رواناب مربوط به زیراشکوب گونه‌های سرو زرین در دو بازه زمانی ۳۰ دقیقه (۵۲۵/۵/۰۱±۰/۵/۰۱٪) و ۱۵ دقیقه (۱۸۱/۴/۱۹±۰/۴/۱۹٪) بود (شکل ۵).

نتایج تجزیه پراکنش اثر نوع پوشش بر رواناب، ضریب رواناب و رسوب در تیمار با آتش‌سوزی تجویزی نشان داد که اثر نوع پوشش بر رواناب، رسوب و ضریب رواناب معنی‌دار بود (جدول ۵). اندازه رواناب و رسوب در قطعه‌های با آتش‌سوزی تجویزی نیز بررسی شد. بررسی الگوی تشکیل رواناب کل میان قطعه‌های تیمار آتش‌سوزی و مقایسه آن با شرایط زیراشکوب گونه‌های تیمار آتش‌سوزی تجویزی در بازه‌های زمانی آزمایش‌شده نشان داد که آتش‌سوزی باعث افزایش اندازه رواناب در بازه‌های گوناگون شده است و در تیمار شاهد در بازه زمانی ۳۰ دقیقه این افزایش در مقایسه با گونه سرو زرین قابل توجه بود. همچنین، بیشترین اندازه رسوب کل مربوط به تیمار شاهد در بازه زمانی ۳۰ دقیقه بود و

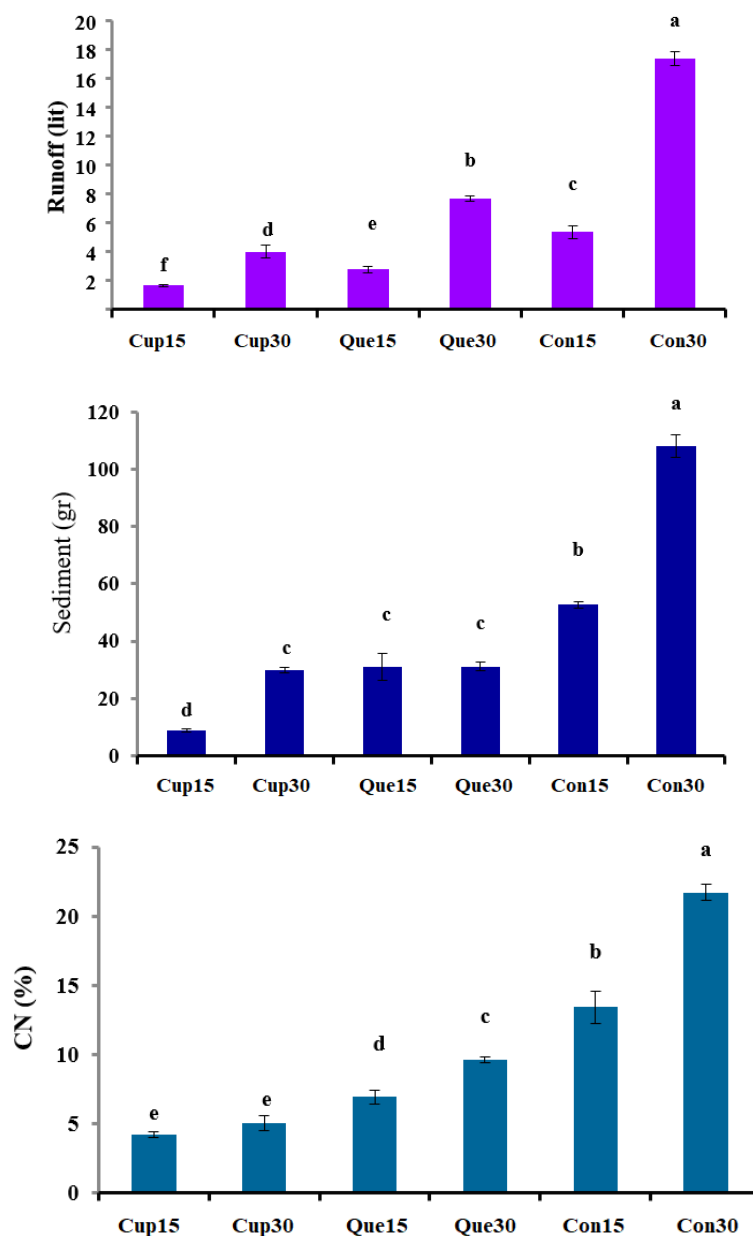
جدول ۵- تجزیه پراکنش اثر نوع پوشش بر رواناب، ضریب رواناب و رسوب در تیمار آتش‌سوزی تجویزی.

Table 5- The result of analysis variance for the effect of vegetation types on runoff, runoff coefficient and sediment in prescribed fire treatment.

Sig.value	f	df	Variable
0.000*	284.20	5	Runoff
0.000*	113.585	5	Sediment
0.000*	221809.65	5	CN

Significance of differences at 1%

*معنی‌داری تفاوت‌ها در سطح ۱٪



شکل ۵- مقایسه میانگین اندازه رواناب، رسوب و ضریب رواناب میان انواع گوناگون پوشش گیاهی در تیمار آتش‌سوزی تجویزی (Cup=سروربین، Que=بلوط ایرانی، Con=شاهد).

Figure 5- The mean comparison of runoff, runoff coefficient and sediment between different vegetation types in prescribed fire treatment (Cup=Cupressus sempervirens, Que=Quercus brantii Lindl, Con=Control).

نتایج تجزیهٔ پراکنش یک‌طرفه (ANOVA) نشان داد که در تیمار با آتش‌سوزی تجویزی، اثر نوع پوشش در دو بازهٔ زمانی ۱۵ و ۳۰ دقیقه بر خصوصیات شیمیایی رواناب از جمله شوری، کلسیم، کلر، پتاسیم، سدیم و بی‌کربنات معنی‌دار بود؛ ولی بر اسیدیته و نسبت جذب سدیم و منیزیم معنی‌دار نبود (جدول ۶).

اثر تیمارهای گوناگون آزمایشی بر خصوصیات شیمیایی رواناب در تیمار با آتش‌سوزی و بدون آتش‌سوزی در بازهٔ زمانی ۱۵ و ۳۰ دقیقه نتایج تجزیهٔ پراکنش اثر نوع پوشش (زیر اشکوب جنگل کاری سرو زربین، تودهٔ جنگلی طبیعی بلوط و خارج از تاج‌پوشش) بر خصوصیات شیمیایی رواناب در منطقه با آتش‌سوزی تجویزی در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶- تجزیهٔ پراکنش اثر نوع پوشش بر خصوصیات شیمیایی رواناب در تیمار آتش‌سوزی تجویزی.

Table 6- The result of analysis variance for the effect of vegetation types on chemical characteristics of runoff in prescribed fire treatment.

Sig.value	f	df	Variable
0.209	1.70	5	pH
<u>0.002</u>	7.55	5	EC
<u>0.023</u>	3.97	5	Ca
<u>0.000</u>	19.57	5	Cl
<u>0.002</u>	7.66	5	K
0.052	4.43	5	Mg
<u>0.019</u>	4.19	5	Na
<u>0.000</u>	17.73	5	Bicarbonate
0.251	1.53	5	SAR

اعداد با خط زیر نشان‌دهنده معنی‌داری تفاوت‌ها در سطح یک و پنج درصد است.

Underlined values indicate significant differences at 1 and 5%.

در میان دیگر تیمارهای آزمایشی تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. بیشترین اندازه‌های سدیم، نسبت جذبی سدیم و پتاسیم در تودهٔ سرو در بازهٔ زمانی ۱۵ دقیقه به ترتیب 0.36 ± 0.08 ، 0.58 ± 0.04 ، 0.33 ± 0.09 ، 0.40 ± 0.09 ، 0.42 ± 0.18 و 0.18 ± 0.01 میلی‌اکی‌والانت در لیتر بود. در حالی که کمترین اندازه‌های این سنج‌ها در تیمار شاهد در بازهٔ زمانی ۳۰ دقیقه به ترتیب 0.24 ± 0.04 ، 0.43 ± 0.10 ، 0.14 ± 0.03 و 0.26 ± 0.02 میلی‌اکی‌والانت در لیتر بود. بیشترین اندازهٔ بی‌کربنات در تودهٔ بلوط در بازهٔ زمانی ۱۵ دقیقه 0.29 ± 0.02 میلی‌اکی‌والانت در لیتر بود و کمترین اندازهٔ آن در تیمار شاهد در بازهٔ زمانی ۳۰ دقیقه 0.17 ± 0.01 میلی‌اکی‌والانت در لیتر بود. همچنین، بیشترین اندازهٔ منیزیم در تودهٔ سرو در بازهٔ زمانی ۳۰ دقیقه 0.27 ± 0.01 میلی‌اکی‌والانت در لیتر بود و کمترین اندازهٔ آن در تودهٔ بلوط در بازهٔ زمانی ۳۰ دقیقه 0.14 ± 0.01 میلی‌اکی‌والانت در لیتر بود (جدول ۷).

نتایج مقایسهٔ میانگین خصوصیات شیمیایی رواناب در دو بازهٔ زمانی ۱۵ و ۳۰ دقیقه در تیمار با آتش‌سوزی تجویزی نشان داد که بیش‌ترین اندازهٔ pH مربوط به تیمارشاهد در بازهٔ زمانی ۳۰ دقیقه (6.17 ± 0.27) بود و کم‌ترین اندازهٔ آن مربوط به تودهٔ سرو در بازهٔ زمانی ۱۵ دقیقه (5.71 ± 0.04) بود. میان تیمارهای آزمایشی کمترین اندازهٔ EC یا شوری مربوط به تیمار شاهد در بازهٔ زمانی ۳۰ دقیقه (0.47 ± 0.01) دسی-زیمنس بر متر بود، در حالی که میان دیگر تیمارها تفاوتی وجود نداشت. بیشترین اندازهٔ کلر مربوط به تودهٔ بلوط در بازهٔ زمانی ۱۵ دقیقه (2.55 ± 0.08) میلی‌اکی‌والانت در لیتر بود و کمترین اندازهٔ آن در تیمار شاهد در بازهٔ زمانی ۳۰ دقیقه (0.33 ± 0.01) میلی‌اکی‌والانت در لیتر بود. بیشترین اندازهٔ کلسیم در تودهٔ سرو در بازهٔ زمانی ۱۵ دقیقه (2.25 ± 0.08) میلی‌اکی‌والانت در لیتر بود در حالی که در تیمار شاهد در بازهٔ زمانی ۱۵ دقیقه (1.76 ± 0.08) میلی‌اکی‌والانت در لیتر به‌دست آمد و

جدول ۷- مقایسهٔ میانگین خصوصیات شیمیایی رواناب میان انواع گوناگون پوشش گیاهی در تیمار آتش‌سوزی تجویزی.

Table 7- The mean comparison of chemical characteristics of runoff between different vegetation types in prescribed fire treatment.

Control (30 min.)	Control (15 min.)	Cupressus sempervirens (30 min.)	Cupressus sempervirens (15 min.)	Quercus brantii (30 min.)	Quercus brantii (15 min.)	Characrestics
6.17 ± 0.27^a	5.83 ± 0.07^{ab}	5.74 ± 0.014^b	5.71 ± 0.043^b	5.74 ± 0.74^{ab}	6 ± 0.147^{ab}	pH
0.476 ± 0.017^c	0.549 ± 0.034^{bc}	0.622 ± 0.004^{ab}	0.659 ± 0.004^a	0.547 ± 0.020^{bc}	0.647 ± 0.041^a	EC
0.533 ± 0.088^c	1.13 ± 0.17^b	0.550 ± 0.028^c	1.40 ± 0.288^b	0.950 ± 0.202^{bc}	2.55 ± 0.086^a	Cl
2.13 ± 0.317^{ab}	1.30 ± 0.152^c	1.60 ± 0.173^{bc}	2.25 ± 0.086^a	1.75 ± 0.144^{abc}	1.80^{abc}	Ca
1.50 ± 0.360^b	1.66 ± 0.417^b	2.70^a	2.05 ± 0.259^{ab}	1.40 ± 0.173^b	1.55 ± 0.259^b	Mg
0.435 ± 0.024^b	0.492 ± 0.037^b	0.520 ± 0.024^{ab}	0.584 ± 0.036^a	0.475 ± 0.012^b	0.475 ± 0.012^b	Na
0.322 ± 0.014^a	0.407 ± 0.024^a	0.356 ± 0.023^a	0.409 ± 0.033^a	0.370 ± 0.028^a	0.356 ± 0.023^a	SAR
0.260^c	0.312 ± 0.015^c	0.675 ± 0.119^{ab}	0.818 ± 0.142^a	0.403 ± 0.022^c	0.481 ± 0.037^c	K
1.76 ± 0.088^d	2.16 ± 0.218^{bc}	2.20^{bc}	2.45 ± 0.028^b	1.90 ± 0.057^{cd}	0.295^a	Bicarbonate

اساس نتایج به‌دست آمده تجزیهٔ پراکنش یک‌طرفه اثر زیر اشکوب تاج‌پوشش بلوط، سرو و تیمار شاهد در دو بازهٔ زمانی ۱۵ و ۳۰ دقیقه بر خصوصیات شیمیایی رواناب (کلر، پتاسیم و نسبت جذبی سدیم) معنی‌دار بود (جدول ۸).

نتایج تجزیهٔ پراکنش اثر تیمارهای آزمایشی (زیر اشکوب جنگل کاری سرو زربین، توده جنگلی طبیعی بلوط و خارج از تاج‌پوشش) بر خصوصیات شیمیایی رواناب در منطقه بدون آتش‌سوزی در جدول ۸ نشان‌داده شده است. بر

جدول ۸- تجزیهٔ پراکنش اثر نوع پوشش بر خصوصیات شیمیایی رواناب در تیمار بدون آتش‌سوزی تجویزی.

Table 8- The result of analysis variance for the effect of vegetation types on chemical characteristics of runoff in unburnt treatment.

Sig.value	f	df	Variable
0.08	415.15	5	pH
0.2	27.39	5	EC
0.2	3.71	5	Ca
0.000*	24.55	5	Cl
0.000*	151.38	5	K
0.16	4.43	5	Mg
0.2	30.07	5	Na
0.06	25.78	5	Bicarbonate
0.000*	113.71	5	SAR

Significance of differences at 1%

*معنی‌داری تفاوت‌ها در سطح ۱٪

آمد. بیشترین اندازهٔ سدیم در تودهٔ بلوط در بازهٔ زمانی ۱۵ دقیقه (0.548 ± 0.074) میلی‌اکی‌والانت در لیتر) بود و کمترین اندازهٔ آن در تیمار شاهد در بازهٔ زمانی ۳۰ دقیقه (0.435 ± 0.024) میلی‌اکی‌والانت در لیتر) بود. بیشترین اندازهٔ بی‌کربنات در تیمار شاهد در بازهٔ زمانی ۱۵ دقیقه (2.16 ± 0.218) میلی‌اکی‌والانت در لیتر) بود و کمترین اندازهٔ آن در تودهٔ بلوط در بازهٔ زمانی ۳۰ دقیقه (1.75 ± 0.028) میلی‌اکی‌والانت در لیتر) به‌دست آمد. بیشترین اندازهٔ پتاسیم در تیمار شاهد در بازهٔ زمانی ۱۵ دقیقه (0.312 ± 0.015) میلی‌اکی‌والانت در لیتر) بود، در حالی که کمترین اندازهٔ آن در تودهٔ بلوط در بازه‌های زمانی ۱۵ و ۳۰ دقیقه (0.183 ± 0.015) میلی‌اکی‌والانت در لیتر) بود. همچنین، بیش‌ترین اندازهٔ منیزیم در تودهٔ بلوط در بازهٔ زمانی ۳۰ دقیقه (2.80 ± 1.015) میلی‌اکی‌والانت در لیتر) به‌دست آمد، در حالی که کمترین اندازهٔ آن در تیمار شاهد در بازهٔ زمانی ۳۰ دقیقه (1.50 ± 0.360) میلی‌اکی‌والانت در لیتر) بود. بیش‌ترین اندازهٔ نسبت جذبی سدیم در تیمار شاهد در بازهٔ زمانی ۱۵ دقیقه (0.407 ± 0.024) بود و کمترین اندازهٔ آن در تیمار شاهد در بازهٔ زمانی ۳۰ دقیقه (0.322 ± 0.014) به‌دست آمد (جدول ۹).

مقایسهٔ میانگین خصوصیات شیمیایی رواناب در تیمار بدون آتش‌سوزی تجویزی

نتایج مقایسهٔ میانگین خصوصیات شیمیایی رواناب در تیمارهای بررسی‌شده شامل زیر اشکوب گونه بلوط، سرو و خارج از تاج‌پوشش در دو بازهٔ زمانی ۱۵ و ۳۰ دقیقه در منطقهٔ مطالعه‌شده بدون آتش‌سوزی نشان داد که بیش‌ترین اندازهٔ pH مربوط به تیمار شاهد در بازهٔ زمانی ۳۰ دقیقه (6.17 ± 0.278) بود و کم‌ترین اندازهٔ آن در تودهٔ بلوط در بازهٔ زمانی ۳۰ دقیقه (5.74 ± 0.22) به‌دست آمد. میان تیمارهای آزمایشی، بیش‌ترین اندازهٔ EC یا شوری مربوط به تودهٔ بلوط در بازهٔ زمانی ۱۵ دقیقه (579 ± 0.097) دسی‌زیمنس بر متر) بود و کم‌ترین اندازهٔ آن در تیمار شاهد در بازهٔ زمانی ۳۰ دقیقه (476 ± 0.017) دسی‌زیمنس بر متر) به‌دست آمد. بیش‌ترین اندازهٔ کلر در تودهٔ بلوط در بازهٔ زمانی ۱۵ دقیقه (533 ± 0.33) میلی‌اکی‌والانت در لیتر) بود و کم‌ترین اندازهٔ آن در تیمار شاهد در بازهٔ زمانی ۱۵ دقیقه (1.13 ± 0.176) میلی‌اکی‌والانت در لیتر) بود. بیش‌ترین اندازهٔ کلسیم در تودهٔ بلوط در بازهٔ زمانی ۱۵ دقیقه (3.93 ± 1.80) میلی‌اکی‌والانت در لیتر) بود، در حالی که کم‌ترین اندازهٔ آن در تیمار شاهد در بازهٔ زمانی ۱۵ دقیقه (1.30 ± 0.152) میلی‌اکی‌والانت در لیتر) به‌دست

جدول ۹- مقایسه میانگین خصوصیات شیمیایی رواناب میان انواع گوناگون پوشش گیاهی در تیمار بدون آتش سوزی.

Table 9- The mean comparison of chemical characteristics of runoff between different vegetation types in unburnt treatment.

Control (30 min.)	Control (15 min.)	Quercus brantii (30 min.)	Quercus brantii (15 min.)	Characrestics
6.17±0.278 ^a	5.83±0.75 ^a	5.74±0.22 ^a	5.940±0.4 ^a	pH
0.476±0.017 ^a	0.549±0.034 ^a	0.529±0.077 ^a	0.533±0.33 ^a	EC
0.533±0.088 ^b	1.13±0.176 ^a	0.400±0.57 ^b	0.533±0.33 ^b	Cl
2.13±0.317 ^a	1.30±0.152 ^a	2.30±0.05 ^a	3.93±1.80 ^a	Ca
1.50±0.360 ^a	1.66±0.417 ^a	2.80±1.15 ^a	1.83±0.14 ^a	Mg
0.435±0.024 ^a	0.492±0.037 ^a	0.534±0.78 ^a	0.548±0.74 ^a	Na
0.332±0.14 ^b	0.407±0.24 ^a	0.336±0.12 ^b	0.334±0.28 ^b	SAR
0.260 ^b	0.312±0.15 ^a	0.183±0.15 ^c	0.183±0.15 ^c	K
1.76±0.088 ^a	2.16±0.218 ^a	2.13±0.433 ^a	1.75±0.028 ^a	Bicarbonate

بحث و نتیجه گیری

تجزیه و تحلیل اندازه هدایت الکتریکی (EC) نشان داد که شرایط آتش سوزی منجر به افزایش اندازه هدایت الکتریکی در قطعه های مستقر در توده های سرو و بلوط شد. افزایش هدایت الکتریکی پس از آتش سوزی می تواند به دلیل سوخته شدن مواد آلی و انتقال حرارت به ترکیبات غیر آلی در خاک ها باشد که منجر به افزایش غلظت کل یون ها به ویژه کاتیون های دو ظرفیتی می شود (جیووانینی و همکاران ۱۹۹۰؛ سرتینی ۲۰۰۵). این نتایج با یافته های دیگر پژوهشگران مبنی بر افزایش شوری در تیماهاری با آتش سوزی، هم راستا است (اینبار و همکاران ۲۰۱۴؛ پاردینی ۲۰۰۴؛ تیرف و همکاران ۲۰۰۸؛ آلكانز و همکاران ۲۰۱۸). بررسی تغییرات اندازه های pH نشان داد که این سنجه در قطعه های تیمار سرو دست کاشت و بلوط طبیعی افزایش یافت. افزایش اندازه های pH، می تواند به دلیل سوخته شدن اسیدهای آلی و از بین رفتن اثرات آنها باشد. در پژوهشی آرسینا و اوپیا (۲۰۰۰) تأکید کردند که دماهای زیاد (بیش از ۳۰۰°C) می تواند منجر به سوخته شدن کامل مواد آلی و افزایش pH در خاک شود که با یافته های این پژوهش هم راستا است. تحلیل نتایج اثر آتش سوزی بر اندازه رواناب نشان داد که آتش سوزی منجر به کاهش معنی دار بازه زمانی شروع رواناب (آستانه هرز آب) در قطعه های مستقر در جنگل دست کاشت سرو زربین شد که دلیل آن می تواند اثر آتش سوزی بر افزایش آب گریزی در سطح خاک باشد. نتایج تولید رواناب بعد از آتش سوزی نیز نشان داد که اندازه رواناب در قطعه های مستقر در عرصه جنگل دست کاشت سرو زربین و جنگل

طبیعی بلوط به طور معنی داری (بیش از ۵۰٪) افزایش یافت. نتایج افزایش رواناب در اثر آتش سوزی با یافته های سردا و دوئر (۲۰۰۸) هم خوانی دارد. تحلیل نتایج رسوب خروجی از قطعه های هر دو تیمار جنگل دست کاشت سرو زربین و جنگل طبیعی بلوط نشان داد که پس از آتش سوزی اندازه رسوب در هر دو به دلیل افزایش رواناب کل، افزایش یافت. افزایش رسوب تابعی از قطر قطرات آب روی خاک و انتقال رسوبات حاصل در اثر رواناب سطحی است (باور و همکاران ۱۹۷۲). در نتیجه دلیل افزایش رسوب در خروجی قطعه ها می تواند به دلیل عامل های چون: الف- از بین رفتن پایداری ایجاد شده و افزایش هدررفت خاک در قطعه های جنگل دست کاشت سرو زربین و جنگل طبیعی بلوط در مدت بارش شبیه سازی شده، ب- افزایش رواناب ناشی از افزایش آب گریزی در قطعه های آزمایشی که می تواند موجب افزایش تلفات خاک و در نتیجه افزایش رسوب در خروجی قطعه کاربری های جنگل دست کاشت سرو و جنگل طبیعی بلوط شود. در این پژوهش، آتش سوزی تجویزی موجب تغییر اندازه رواناب و رسوب کل در دو تیمار مطالعه شده در جنگل سوزنی برگ و جنگل طبیعی بلوط شد. همچنین، کمتر بودن اندازه رواناب در توده سرو قبل از آتش سوزی می تواند به دلیل انباشت تجمع زیاد لاشبرگ سوزنی برگ ها و اسیدی بودن آن و روند تجزیه کند آن باشد. از این رو، انباشت ضخیم از لاشبرگ سوزنی برگ ها در توده سرو در مقایسه با توده بلوط باعث کاهش بیشتر رواناب در این توده در مقایسه با توده بلوط شد (بینکلی و فیشر، ۲۰۱۹). نتایج این پژوهش با یافته های پژوهش های رضایی (۲۰۱۶)، عباسی و همکاران

پوشش بر سنجه‌های خاک در شرایط گوناگون مکانی، معنی‌دار بود و یکی از عامل‌های تولید رواناب و هدررفت خاک بود. پیشنهاد می‌شود اثر شدت‌ها و مدت‌های گوناگون بارش بر سنجه‌های خاک و گونه‌های متفاوت جنگلی در شیب‌های گوناگون بررسی شود. همچنین، مبتنی بر نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود اثرات برخی مواد اصلاح‌کننده افزودنی به خاک و تأثیر آنها بر سنجه‌های قابل اندازه‌گیری بررسی شود.

(۲۰۱۷)، مقدمی‌راد و همکاران (۲۰۱۸)، حیدری و همکاران (۲۰۱۸)، کاویان و همکاران (۲۰۱۴)، ستون و پرایس (۲۰۲۰)، محمدی و همکاران (۲۰۱۲) و رستمی و همکاران (۲۰۲۲) هم راستا است. بر اساس نتایج این پژوهش، مشخص شد که هر تغییر در عرصه‌های طبیعی مانند آتش‌سوزی می‌تواند فرایند تولید رواناب را افزایش دهد و باعث هدررفت عناصر موجود در خاک شود. همچنین، آتش‌سوزی باعث تغییر برخی خصوصیات شیمیایی رواناب شد. سرانجام می‌توان گفت اثر نوع

فهرست منابع

- Abbasi M, Najafi nejad A, Sheikh VB, Azim Mohseni M. 2017. Investigating land use and slope effects on soil properties, runoff and sediment using rainfall simulator case study of kechik watershed in Golestan Province. *Environmental Erosion Research Journal*, 6(4):104-124.
- Adami M, Khalidi Darvishan AV. 2022. Evaluation of water runoff components in laboratory plots with protection treatment of straw. *Watershed Management Research*, 34(1):112-125. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/wmej.2020.123747.1162>
- Akhzari D, Mohammadi E, Saedi K. 2022. Studying the effect of fire on some vegetation and soil properties in a semi-arid shrubland (Case study: Kachaleh Rangelands, Kamyaran Region). *Ecopersia*, 10(1):27-35.
- Alcañiz M, Outeiro L, Francos M, Úbeda X. 2018. Effects of prescribed fires on soil properties: A review. *Science of the Total Environment*, . pp. 944-957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017>
- Anon. 1982. Organic material and soil productivity in the near east. FAO. *Soil Bulletin*. No. 45 p.
- Arabkhedri M, Shadfar S, Jafari Ardakani A, Bayat R, Khajavi E, Mahdian MH. 2018. Improving water erosion estimates for Iran. *Watershed Management Research Journal*, 31(3):13-27. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/wmej.2018.121424.1106>
- ASTM. 2004. ASTM D1776-04. Standard practice for conditioning and testing textiles. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania. USA.
- Baver LD, Gardner WH, Gardner WR. 1972. *Soil physics*(No. 04; S592. 3, B38 1972.). New York: Wiley. 498 p.
- Behrahi K, Sayyad GhA, Landi A, Pirvan HR. 2018. Effect of land use type and land slope degree on runoff quantity using artificial rain simulator, case study: Kakasharaf watershed (Lorestan Province). *Watershed Engineering and Management*, 10(1):58-70. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.115660>
- Binkley D. Fisher RF. 2019. *Ecology and management of forest soils*, 5th Edition. Wiley-Blackwell. 456 p.
- Casermeiro MA, Molina JA, Delacruz Caravaca MT, Hernando Massanet MI, Morena PS. 2004. Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soils of Mediterranean climate. *Catena*, 57(1):91-107. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00160-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00160-7)
- Castro FC, Lourenço A, Guimarães MDF, Fonseca ICB. 2002. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil. *Soil and Tillage Research*, 65(1):45-51. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00275-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00275-6)
- Celik I. 2005. Land- use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean Highland of Turkey, *soil and Tillage Research*, 83(2):270-277. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.001>
- Cerdà A, Doerr Sh. 2008. The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. *Catena*, 74(3):256-263. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.03.010>
- Certini G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143:1-10. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>
- Emadi M, Baghernejad M, Memarian HM. 2009. Effect of land use change on soil Fertility characteristics within water- stable aggregates of two cultivated soils in Northern Iran. *Land Use Policy*, 26(2):452-457. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2008.06.001>
- Fadaei Z, Kavian A, Solaimani K, Sarabsoreh LZ, Kalehhouei M, Zuazo VHD, Rodrigo Comino J. 2022. The response of soil physicochemical properties in the hyrcanian for-

- ests of Iran to forest fire events. *fire*, 5(6):1-17. <https://doi.org/10.3390/fire5060195>
- Farhadifar A, Dianati Tilaki GA, Kooch Y. 2021. The effects of forest and rangelands covers on accumulation of soil nutrient elements in Kojour region. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 34(3):706-716. (In Persian).
- Giovannini C, Lucchesi S, Giachetti M. 1990. effects of heating on some chemical parameters related to soil fertility and plant growth. *Soil Science*, 149(6):344-350.
- Heidary K, Najafinejad A, Mohammadian Behbahani A, Ownegh M. 2018. assessment of soil water repellency intensity and Its temporal variability after prescribed fire in forest areas of Toshen Watershed, Golestan Province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(4):27-47. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.14663.2960>
- Heydari M, Zeynali N, Bazgir M, Omidipour R, Kohzadian M, Sagar R, Prevosto B. 2020. Rapid recovery of the vegetation diversity and soil fertility after cropland abandonment in a semiarid oak ecosystem: An approach based on plant functional groups. *Ecological Engineering*, 155:105963. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105963>
- Ilam meteorological organization. 2023. Weather and Climatic Reports. Ilam, Iran.
- Inbar A, Lado M, Sternberg M, Tenau H, Ben Hur M. 2014. Forest fire effects on soil chemical and physicochemical properties, infiltration, runoff, and erosion in a semi-arid mediterranean Region. *Geoderma*, 221-222():131-138. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.015>
- Jackson ML. 1967. Soil chemical analysis. Prentice-Hall of India Pvt. Ltd., New Delhi, 498 p.
- Janeau JL, LC Gillard S, Grellier f, Jouquet TPQ, Le TNM, Luu QA, Ngo D, orange, et al. 2014. Soil erosion, dissolved Organic Carbon and nutrient Losses under different land use systems in a small catchment in northern Vietnam. *Agricultural Water Management*, 146:134-323.
- Javadi S, Zehtabian Gh, Jafari M, Khosravi H, Abolhasani A. 2020. Investigation and comparison of soil nutrients under different land uses and crop patterns (Case Study: Eshtehard). *Journal of Range and Watershed Management*, 72(4):941-950. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2019.274414.1348>
- Jones AJ, Grisso RD, Shapire CA. 2014. CC342 Soil Compaction: Fact and Fiction. Common questions and their answers. Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln Extension. 3349. USA
- Kalehhouei M, Sadeghi SH, Darvishan AK. 2023. Changeability of runoff and soil loss from inclined mid-sized plots under simulated upward wind-driven rain. *Catena*, 232(107453):1-18. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107453>.
- Kastridis A, Stathis D, Sapountzis M, Theodosiou G. 2022. Insect outbreak and long-term post-fire effects on soil erosion in mediterranean suburban forest. *land*, 11(6):1-15. <https://doi.org/10.3390/land11060911>
- Kavian A, Asgariyan R, Jafarian Jeloudar Z, Bahmanyar MA. 2014. Effect of soil properties on Runoff and Sediment Yield in Farm Scale (case study: a part of soil town's neighboring croplands). *Water and Soil Science*, 23(4):45-57.
- Lal R. 2012. Climate Change and Soil Degradation Mitigation by Sustainable Management of Soils and Other Natural Resources. *Agricultural Research*, 1:199-212. <https://doi.org/10.1007/s40003-012-0031-9>
- Lee S, Ryu JH, Kim L. 2007. Landslide susceptibility analysis and its verification using likelihood ratio, logistic regression, and artificial neural network models: case study of Youngin, Korea. *Landslides*, 4(4):327-338. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0088-x>
- Moghadamirad M, Moayeri MH, Abdi E, Ghorani Vaghei H. 2018. Effect of vegetation cover density on runoff and soil loss of interrill erosion in forest road cut slope (Case

- study: Koohmian Forest-Azadshahr). *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(2):219-233. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.12464.2719>
- mohammadi S, Karimzadeh H, Alizadeh M. 2018. Spatial estimation of soil erosion in Iran using RUSLE model. *Iranian journal of Ecohydrology*, 5(2):551-569. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ije.2018.239777.706>
- Mohammady M, Pourghasemi HR, Pradhan B. 2012. Landslide susceptibility mapping at Golestan Province Iran: A comparison between frequency ratio, Dempster-Shafer, and weights-of-evidence models. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61(15):221-236. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.10.005>
- Morgan RPC, Quinton JN, Smith RE, Govers G, Poesen JWA, Auerswald K, Chisci G, Torri D, Styczen ME. 1998. The european soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group*, 23(6):527-544. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199806\)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199806)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5)
- Nikjo Vakilabad F, Shahab Arkhazloo H, Goli Kalanpa E, Asghari Sh. 2023. Investigating the effect of polyacrylamide concentration and slope position on soil erosion and leaching of elements. *Environmental Erosion Research Journal*, 13(2):192-209.
- Noor H, Arabkherdi M, Dastranj A. 2023. Evaluation of the sediment yield in small watersheds of arid rangeland in the northeast of Iran (Case study: Sanganeh Soil Conservation Research Station). *Integrated Watershed Management*, 3(3):35-48. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/iwm.2023.2005363.1088>
- Noor H, Mirnia Kh. 2011. Organic matter Losses in Kojour watershed. *Journal of Water and Soil Conservation Research*. 18(3):207-212. (In Persian).
- Pardini R. 2004. Effects of forest fragmentation on small mammals in an Atlantic Forest landscape. *Biodiversity and Conservation*, 13:2567-2586. <https://doi.org/10.1023/B:BIOC.0000048452.18878.2d>
- Rad JE, Heidari M, Mahdavi A, Zeinivandzadeh M. 2011. Impact of recreational activities on vegetation and soil in forest park (Case study: Choghasabz Forest Park-Ilam). *Iranian Journal of Forest*, 3(1):71-80.
- Refahi HGh. 2006. Water erosion and conservation. University of Tehran Press (5 Ed), 651p.
- Rezaei K. 2016. Classification and determination of erodibility indices of marls in south-east of Pishva-Varamin area using rainfall simulator. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 7(26):53-39.
- Roostami N, Heydari M, Mijan Uddin SM, Lucas-Borja M.E. 2022. Hydrological response of burned soils in croplands, and pine and oak forests in Zagros Forest Ecosystem (Western Iran) under Rainfall Simulations at Micro-Plot Scale. *Forests*, 13(246):1-16. <https://doi.org/10.3390/f13020246>
- Roostami N, Rabbani M. 2023. Zoning of soil erodibility and determination of affecting factors (Case study: Golan Watershed, Ilam). *Integrated Watershed Management*, 3(3):1-15. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/iwm.2023.2004738.1084>
- Šamonil P, Daněk P, Lutz JA, Anderson-Teixeira KJ, Jaroš J, Phillips JD, Rousová A, Adam D, Larson AJ, Kašpar J, Janik D, Vašíčková I, Gonzalez-Akre E, Egli M. 2022. Tree mortality may drive landscape formation: Comparative study from ten temperate forests. *Ecosystems*, 26(2):257-276. <https://doi.org/10.1007/s10021-022-00755-8>
- Sheikh VB, Jafari Shalamzari M, Farajollahi A, Fazli P. 2016. Soil erosion under simulated rainfall in loess lands with emphasis on land-use, slope and aspect. *Ecopersia*, 4(2):1395-1409. [Doi.org/10.18869/modares.Ecopersia.4.2.1395](https://doi.org/10.18869/modares.Ecopersia.4.2.1395)
- Sheikh VB, Shalamzari MJ, Farajollahi A. 2017. Sediment-bound soil nutrient loss under sim-

- ulated rainfall. Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University, 67(1):37-48. <https://doi.org/10.17099/jffiu.95610>
- Singh D, Sharma P, Kumar U, Daverey A, Arunachalam K. 2021. Effect of forest fire on soil microbial biomass and enzymatic activity in oak and pine forests of Uttarakhand Himalaya, India. Ecological Processes. 7: 10(29): 1-14. <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00293-6>
- Solaimani K, Azmoudeh A. 2011. investigation of land use change effects on some physical and chemical properties, as well as the soil erodibility. Physical Geography Research, 42(4):111-123.
- Stevenson FJ. 1994. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. John Wiley and Sons.
- Sutton OF, Price JS. 2020. Modelling the hydrologic effects of vegetation growth on the long-term trajectory of a reclamation watershed, Science of The Total Environment, 734: 139323. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139323>.
- Terefe T, Mariscal-Sancho I, Peregrina F, Espejo R. 2008. Influence of heating on various properties of six Mediterranean soils. A laboratory study. Geoderma, 143(3-4):273-280. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.11.018>
- Vaezi A. 2005. The effect of organic matter on reducing soil erodibility in agricultural soils. The 9th Congress of Soil Sciences of Iran. pp.1-3. (In Persian).
- Zhao B, Zhang L, Xia Zh, Xu W, Xia L, Liang Y, Xia D. 2019. Effects of rainfall intensity and Vegetation cover on erosion characteristics of a soil containing rock fragments slope, Hindawi Advances in Civil Engineering. pp.1-14. <https://doi.org/10.1155/2019/7043428>



Fars Agricultural and Natural Resources
Research and Education Center



Agricultural Research, Education
and Extension Organization

Evaluation of the Role of Rainfall Characteristics and Prescribed Fire on the Runoff and Leaching of Soil Nutrients in the Chogha Sabz Park, Ilam

Tahereh Arghand¹, Noredin Rostami², Mehdi Heydari³, Morteza Gheysouri⁴

1- M.Sc. Student of Combating Desertification, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture, Ilam University, Iran

2- Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture, Ilam University, Iran

3- Professor, Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, Ilam University, Iran

4- Ph.D. of Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Soil is one of the most important components of the earth and has a number of functions and ecosystem services that are essential for sustainable life on the planet. Soil loss due to erosion occurs almost all over the world and reduces the productivity of natural ecosystems such as forests, rangelands, and agricultural lands. The present study investigated the role of rainfall duration on runoff and soil nutrients under different plant species in the Chogha Sabz Park, Ilam Province.

Materials and Methods

In this study the amount of runoff was determined in afforested stands (*Cupressus sempervirens* L.), natural *Quercus brantii* Lindl. forest, and control treatment based on the representative stand principle in burned and unburned conditions. The rainfall simulator was installed in a 2 m² plot during 15 and 30 min of rainfall with a constant intensity of 80 mm/h. This study investigated the effect of species type on the amount of runoff, sediment, and nutrients. The basic characteristics, including soil texture, litter depth, and pH, were also measured and the results were analyzed using one-way variance test and comparison of means was performed using Duncan's multiple range test.

Results and Discussion

The results of the runoff study in the experimental plots of the prescribed fire treatment and the

Article Type: Research Article

*Corresponding Author E-mail: n.rostami@ilam.ac.ir

Citation: Arghand, T., Rostami, N., Heydari, M., Gheysouri, M. 2024. Evaluation of the Role of Rainfall Characteristics and Prescribed Fire on the Runoff and Leaching of Soil Nutrients in the Chogha Sabz Park, Ilam, Ilam. Watershed Management Research. 37(4): 99-118.

DOI: 10.22092/WMRJ.2024.364885.1575

Received: 01 February 2024, **Received in revised form:** 09 March 2024, **Accepted:** 18 March 2024

Published online: 01 January 2025

Watershed Management Research, VOL. 37, No.4, Ser. No:145, Winter 2025, pp. 99-118.

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



comparison of the studied species in the time intervals showed that in different intervals, fire caused an increase in the amount of runoff, so that in a 30-min interval in the control plot, a runoff of 17 l was produced, which was a significant increase compared to the two stands of *Cupressus sempervirens* L. and *Quercus brantii* Lindl. Also, the highest amount of total sediment in the 30-min interval in the control plot was 108.15 g, and its lowest amount was 52.64 g in the 15-min interval in the coniferous species of *Cupressus sempervirens* L. On the other hand, in the unburned condition, it was determined that the highest amount of runoff in the studied area was in the 15- and 30-min intervals in the control plot, with amounts of 5 and 17 l, respectively. Simultaneous examination of runoff and sediment in the experimental plots showed that the trends in both were similar and that as runoff increased, sediment also increased.

Conclusion and Suggestions

According to the results of this study, it was determined that changes in the natural areas of the Zagros, such as fires, can increase the process of runoff production, causing the loss of nutrients in the soil and changing the chemical properties of the soil. It is suggested that the effect of adding organic soil amendments or cover on soil, runoff and sediment properties after fire be investigated and simulated.

Keywords: Curve Number, Fire, Rainfall Simulator, Soil Loss, Soil Nutrients



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



معاونت تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

صحت‌سنجی استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز برای برآورد فرسایش پاشمانی و سطحی

رضا زارعی^۱، مصطفی آدمی^۲، عبدالواحد خالدی درویشان^{۳*}

- ۱ - دانشجوی دکتری آبخیزداری، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
- ۲ - دانشجوی دکتری آبخیزداری، گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
- ۳ - دانشیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی و کشاورزی در جهان به‌شمار می‌رود. پاشمان خاک اولین مرحله بعد از برخورد قطرات باران بر سطح خاک است که موجب نابودی خاکدانه‌ها، جدا شدن ذرات خاک و سرانجام باعث فرسایش پاشمانی می‌شود. پس از این فرآیند کاهش نفوذپذیری خاک، افزایش رواناب و در نتیجه فرسایش سطحی رخ خواهد داد. بنابراین، برآورد صحیح فرسایش پاشمانی و سطحی برای موفقیت اقدام‌های حفاظت خاک و مهار فرسایش و کاهش بحران‌های طبیعی ضروری است. در این راستا، روش‌های جدیدی با استفاده از عکس‌برداری و فنون پردازش تصویر برای برآورد فرسایش پاشمانی و سطحی ابداع شده است. هدف از این پژوهش صحت‌سنجی استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز برای برآورد فرسایش پاشمانی و سطحی بود.

مواد و روش‌ها

ابتدا خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز با استفاده از ذرات پوکة معدنی و رنگ بتن زرد تهیه شد. سپس، خاک با بافت سیلتی-رسی-لومی از کناره‌های جاده مرزن‌آباد-کندلوس برداشت شد و خاکدانه‌های طبیعی و رنگی دست‌ساز با قطرهای ۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵ میلی‌متر تفکیک شد. سپس، فرسایش سطحی در کرت‌های ۲۰×۴۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد. همچنین، فرسایش پاشمانی با روش فنجان پاشمان در شدت بارندگی ۶۰ میلی‌متر در ساعت با دوام ۱۰ دقیقه و در سه تکرار اندازه‌گیری شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.khaledi@modares.ac.ir

استناد: زارعی، ر.، آدمی، م.، خالدی درویشان، ع. ۱۴۰۳. صحت‌سنجی استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز برای برآورد فرسایش پاشمانی و سطحی. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۷ (۴): ۱۱۹-۱۳۴.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2024.364785.1573

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۳، دوره ۳۷، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۴۵، زمستان ۱۴۰۳، صفحه‌های ۱۱۹ تا ۱۳۴.

© نویسندگان

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



نتایج و بحث

نتایج نشان داد که برای قطرهای ۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵ میلی‌متر خاکدانه، میانگین پاشمان خالص به ترتیب ۷۳/۷۲، ۳۸/۷۳ و ۲۰/۶۸ گرم بر مترمربع بود و میانگین پاشمان کل نیز به ترتیب ۱۹۲/۶۱، ۷۳/۹۷ و ۴۴/۴۶ گرم بر مترمربع بود. این نتایج نشان داد با افزایش قطر خاکدانه‌ها میانگین پاشمان خالص و پاشمان کل کاهش یافت. افزون بر این، ضریب‌های تبیین روابط خطی برآورد پاشمان خالص، پاشمان کل و فرسایش سطحی با استفاده از روش خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز به ترتیب ۸۲،۷۰ و ۸۲٪ بود که بیانگر کارایی قابل قبول این روش است. همچنین، برای قطرهای ۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵ میلی‌متر خاکدانه میانگین هدررفت خاک به ترتیب ۹۴/۶۹، ۸۳/۲۲ و ۴۲/۲۰ گرم بر مترمربع بود. به بیان دیگر، فرسایش سطحی با افزایش قطر خاکدانه‌های سطح خاک کاهش یافت.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان گفت با استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز در زمان کوتاه‌تر می‌توان فرسایش پاشمانی و فرسایش سطحی را با دقت قابل قبول در مقیاس کرت برآورد کرد. از آنجایی که در این روش نمونه‌برداری از رواناب و رسوب کرت لازم نبود، هزینه انجام پژوهش‌های فرسایش و رسوب نیز کاهش یافت. همچنین، روش خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز موجب دست‌خوردگی سطح خاک نشد و از نظر محیط زیستی نیز مشکلی ایجاد نکرد. از این رو، پیشنهاد می‌شود که برای برآورد غیرمستقیم فرسایش پاشمانی و فرسایش سطحی در پژوهش‌های میدانی و آزمایشگاهی از این روش استفاده شود.

واژگان کلیدی: رسوب، رواناب، شبیه‌ساز باران، فرسایش ورقه‌ای، فنجان پاشمان

مقدمه

فرسایش خاک^۱ یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی، منابع طبیعی و کشاورزی در جهان به‌شمار می‌آید که در سال‌های گذشته با افزایش جمعیت و دگرگونی فعالیت‌های انسانی بر این فرآیند افزوده شده است (بایرامین و همکاران ۲۰۰۳؛ بوریلو و همکاران ۲۰۱۴، بوریلو و همکاران ۲۰۲۱). در این میان مدیریت منابع خاک با مهار و کاهش فرسایش خاک به‌منظور تولید و بهره‌برداری پایدار ضروری به‌نظر می‌رسد. در این راستا، شناخت عوامل مؤثر و اندازه‌گیری اندازه فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین مراحل مدیریت عرصه‌های منابع طبیعی است (وانگ و همکاران ۲۰۲۲، صادقی و همکاران ۲۰۲۳). یکی از گسترده‌ترین انواع فرسایش، فرسایش آبی است (ژنگ ۲۰۰۵، لیو و همکاران ۲۰۲۲). اولین مرحله در فرسایش آبی، برخورد قطرات باران بر سطح خاک و نابودی خاکدانه‌ها و پاشمان خاک و تشکیل رواناب و شروع فرآیند فرسایش سطحی (ورقه‌ای) خاک است که به‌عنوان رویدادهای اولیه، در فرسایش خاک می‌باشند (خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۱۲، سان و همکاران ۲۰۲۲). از پیامدهای نامطلوب فرسایش پاشمانی و سطحی می‌توان به کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب اشاره کرد (خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۲۱). خاکدانه‌های سطح زمین، در مقابل نیروهای ویرانگر

ساختمان خاک، بسیار حساس هستند. این خاکدانه‌ها در اثر برخورد قطرات باران با سرعت متوسط، میانگین قطر قطرات ۱/۰۷ میلی‌متر، انرژی جنبشی ۸/۹ ژول بر ثانیه و ضریب یکنواختی ۰/۸۸ (خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۱۴) و یا مرطوب شدن در اثر فرسایش پاشمانی از هم گسیخته شده و باعث جداسازی ذرات خاک می‌شود و با ادامه بارندگی به‌دلیل افزایش رطوبت لایه سطحی و ذرات خاک و کاهش چسبندگی، خاکدانه‌ها با سرعت بیشتری نابود و جدا می‌شوند (خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۱۶، وانگ و همکاران ۲۰۲۳، خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۲۳). با ادامه بارندگی به‌دلیل شکستن و جابه‌جایی خاکدانه‌های سطحی و مسدود شدن منافذ به‌وسیله ذرات ریز خاک، اندوده سطحی تشکیل می‌شود (وی و همکاران ۲۰۰۷، آسولین ۲۰۱۱، زارعی و خالدی‌درویشان ۲۰۲۰، گراندینی و همکاران ۲۰۲۲). این روند باعث کاهش نفوذ و افزایش سرعت آب در سطح خاک شده و رواناب تشکیل می‌شود و در نتیجه فرسایش سطحی رخ می‌دهد (جیووانینیو همکاران ۲۰۰۱، والتیا و همکاران ۲۰۰۶، کوکال و سرکار ۲۰۱۱، ما و همکاران ۲۰۲۲). در پژوهشی، دویرن‌سایگین و اریپول (۲۰۱۲) روابط میان فرسایش پاشمانی و پایداری سنگ‌دانه‌ها در شرایط آزمایشگاهی را با استفاده از خاک‌های سه کاربری

جنگل‌زدایی باعث افزایش پنج برابری فرسایش خاک شد. افزون بر این، در پژوهش نامبرده اثرات جنگل‌زدایی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در خاک‌های سطحی و زیرسطحی بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد انباشت کربن آلی خاک به اندازه ۱۴ میلی گرم در هکتار کاهش یافت. در جنوب‌غربی چین، لی و همکاران (۲۰۲۳) توزیع مجدد خاک و فرآیند فرسایش خاک در طول یک نوار اندازه‌گیری شده (ترانکست) در یک آبخیز معمولی کارستی را با استفاده از سزیم-۱۳۷ ارزیابی کردند. در این پژوهش توزیع سزیم-۱۳۷ با تنوع فضایی زیاد در کل نوار اندازه‌گیری شده در آبخیز (انحراف معیار $0.60/0.4$) مشاهده شد و شیب میانی شدیدترین فرسایش را نشان داد (بیشترین نرخ فرسایش $13/49$ تن در هکتار در سال بود). در این راستا، خالدی‌درویشان و همکاران (۲۰۱۴) فرسایش سطحی را با استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز colour اندازه‌گیری کردند. نتایج این پژوهش نشان داد محدوده منتقل شده از کل خاک میان $90/34$ و $1360/93$ گرم بر مترمربع بود و فرسایش خالص پاشمان میان $36/82$ و $295/78$ اینچ گرم در مترمربع بود. لایبوردا و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر قطرات باران بر سطح خاک را اندازه‌گیری کردند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده همبستگی خطی میان پایداری خاکدانه و فرسایش پاشمانی با ضریب تبیین 0.65 برای هر سه خاک آزمایش شده بود. خالدی‌درویشان و همکاران (۲۰۲۰) سهم‌بندی رسوب در کرت‌های آزمایشگاهی را با استفاده از ردیابی خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز و پردازش تصویر انجام دادند. نتایج این پژوهش بیانگر آن بود که استفاده از این روش برای تهیه نمودارهای سهم رسوب در مقیاس کرت مفید است. با افزایش شدت بارندگی سهم فرسایش بین‌شیاری در تولید رسوب افزایش یافت، و نسبت بازتوزیع رسوب در کرت کاهش یافت. میانگین نسبت تحویل رسوب برای شدت‌های بارندگی ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ میلی‌متر در ساعت به ترتیب $7/30$ ، $8/54$ ، $11/74$ و $15/64$ به دست آمد. همچنین، خالدی‌درویشان و همکاران (۲۰۲۳) استفاده از خاکدانه رنگی دست‌ساز را برای اندازه‌گیری پاشمان ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش قطر خاکدانه‌های طبیعی و دست‌ساز خاک، اندازه فرسایش کل پاشمان و خالص کاهش یافت. همچنین، با افزایش قطر خاکدانه از $1/77$ به $4/50$ میلی‌متر (افزایش بیش از ۲ برابری قطر خاکدانه‌ها) اندازه پاشمان کل و خالص به ترتیب $6/1$ و $5/4$ برابر برای خاکدانه‌های طبیعی و دست‌ساز کاهش یافت. در پژوهش‌های نامبرده، استفاده از خاکدانه‌های

گونگون کشاورزی، مرتع و جنگل تعیین و بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که خاکدانه‌های بزرگ‌تر در کاربری جنگل بیش‌تر شکسته شدند و در نتیجه در شرایط بارندگی شدید اندازه فرسایش پاشمانی در این کاربری در مقایسه با خاک‌های کاربری کشاورزی و علفزار با خاکدانه‌های کوچک‌تر، بیش‌تر بود. بلیانی و واعظی (۲۰۱۷) گزارش کردند که بافت خاک، رطوبت پیشین و شدت باران هر کدام به‌طور جداگانه بر اندازه فرسایش پاشمانی تأثیرگذار بودند و بیش‌ترین اندازه فرسایش در خاک سیلتی و کم‌ترین اندازه فرسایش در خاک شنی مشاهده شد. در پژوهشی، خالدی‌درویشان و شریفی‌مقدم (۲۰۱۶) تغییرات پاشمان خاک در قطره‌های $1/75$ ، $3/55$ و $5/18$ میلی‌متر خاکدانه در یک خاک لومی-رسی-شنی ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش بیانگر آن بود که با افزایش میانگین قطر خاکدانه از $1/75$ به $3/55$ میلی‌متر (افزایش دو برابری قطر خاکدانه‌ها)، اندازه پاشمان ذرات خاک 57% کاهش یافت. همچنین، با افزایش میانگین قطر خاکدانه از $1/75$ به $5/18$ میلی‌متر (افزایش سه برابری قطر خاکدانه‌ها)، اندازه پاشمان خاک 84% کاهش یافت. برای اندازه‌گیری و برآورد فرسایش پاشمانی و سطحی، روش‌های نوینی ارائه شده است. در این راستا، می‌توان به پژوهش دیوسی و کوینتون (۲۰۱۰) اشاره کرد. این پژوهشگران فرسایش سطحی با اکسیدهای حاکی را با روش سم‌پاشی غیر نفوذی برآورد کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که منبع اصلی رسوبات فرسایش یافته نواحی شیب‌دار بود. در پژوهشی، خالدی‌درویشان و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از خاکدانه رنگی دست‌ساز^۲ و فن پردازش تصویر، فرسایش پاشمانی خاک را اندازه‌گیری کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که می‌توان از روش‌های نامبرده برای اندازه‌گیری پاشمان پایین دست خاک، و برآورد اندازه و شدت آن استفاده کرد. پارسونز و همکاران (۲۰۱۴) برای مطالعه فرسایش خاک از برچسب‌های شناسایی فرکانس رادیویی^۳ (RFID) استفاده کردند. در این پژوهش به‌منظور ایجاد چگالی مشابه ذرات کوارتز، ذرات جایگزین خاک با برچسب‌های RFID و خاک رس سیلیکونی و پودر برنز پوشانده شدند. این برچسب‌ها راه‌کاری جدید برای بررسی حرکت ذرات خاک در طول فرآیندهای فرسایش است. خدادادی و همکاران (۲۰۲۳) اثرات تبدیل جنگل‌ها به تاکستان‌های معمول آبخیز دریاچه زیوار ایران، را با استفاده از سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰ بررسی کردند. این پژوهشگران بر اساس نرخ خالص فرسایش خاک به دست آمده به وسیله رویکردهای سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰ گزارش کردند که

2- Synthetic Colour-Contrast Aggregates (SCCA)

3 - Radio Frequency Identification

شدت بارندگی ۶۰ میلی‌متر در ساعت با دوام ۱۰ دقیقه بعد از شروع رواناب در کرت‌های ۲۰×۴۰ و بلندی ۱۵ سانتی‌متر و فنجان پاشمان (طرح مورگان ۱۹۷۸) با قطر ۲۵ سانتی‌متر و بلندی ۱۰ سانتی‌متر با کمی تغییر در ابعاد (خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۱۲ و ۲۰۲۳) و با شیب ۳۰٪ (متناسب با شرایط مادری خاک) در سه تکرار انجام شدند. برخی از این آزمایش‌ها قبلاً برای تعیین مدت زمان بهینه شبیه‌سازی بارندگی انجام شدند تا تعدادی از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز در سطح خاک باقی بمانند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز پس از ۲۰ دقیقه از سطح خاک کاملاً حذف شدند و مشخص شد که پس از آن نمی‌توان تراکم خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز را تعیین کرد. از این رو، مدت زمان بهینه ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد (خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۱۴). نتایج ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مطالعه‌شده در جدول ۱ آورده شده است. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه‌شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

رنگی دست‌ساز برای اندازه‌گیری و امکان‌سنجی برآورد فرسایش پاشمانی و سطحی خاک، بررسی شده است. از این رو، این پژوهش با هدف صحت‌سنجی استفاده از خاکدانه‌های رنگی در برآورد فرسایش پاشمانی و سطحی خاک انجام شد. در این پژوهش با استفاده از روش نوآورانه خاکدانه‌های رنگی، امکان برآورد دقیق‌تر و تحلیل جامع‌تر از فرسایش پاشمانی و سطحی خاک فراهم شد.

مواد و روش‌ها

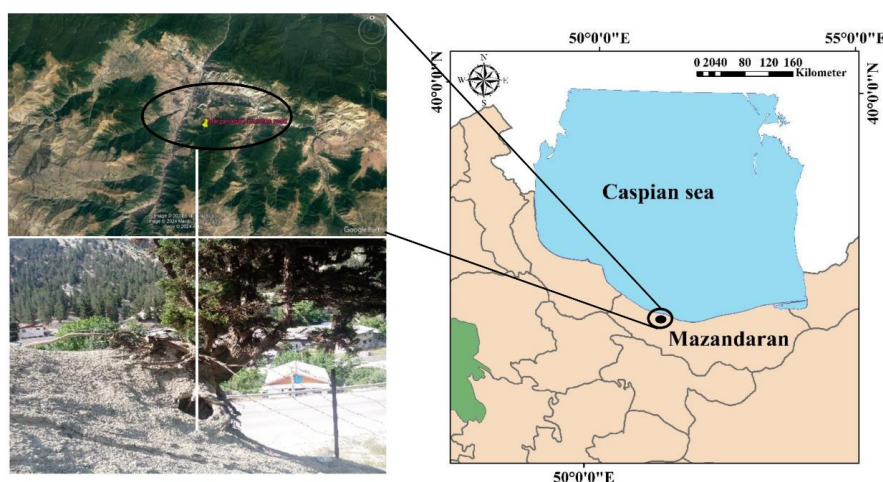
معرفی منطقه مطالعه‌شده

نمونه‌های خاک سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متر) برای انجام این پژوهش از کناره‌های جاده مرزن‌آباد-کندلوس جمع‌آوری شد. بر اساس روش پیشنهادشده به وسیله کوال و سرکار (۲۰۱۰) و مینا و همکاران (۲۰۲۰) نمونه‌های خاک برای انجام آزمایش آماده شدند. سپس، نمونه‌ها به آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و رسوب دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس منتقل شدند. به منظور صحت‌سنجی استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز برای برآورد فرسایش پاشمانی و سطحی، آزمایش‌های مربوطه در

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مطالعه‌شده.

Table 1- Physical and chemical characteristics of the studied soil.

Soil texture	Soil particles (%)			Soil structure	Electrical conduction ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	Organic carbon (%)	Specific gravity of the soil (g/cm^3)
	Sand	Silt	Clay					
Silty-clay-loamy	14	46	40	granular	217.9	7.65	0.18	1.25



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعه‌شده در استان مازندران و ایران.

Figure 1- Location of the study area in Mazandaran Province and Iran

به‌منظور ایجاد بیشترین تشابه میان ویژگی‌های فیزیکی باران شبیه‌سازی‌شده (دانه‌بندی و قطر قطرات) با باران طبیعی، پیش‌بینی‌ها، اندازه‌گیری‌ها و واسنجی‌های لازم در ساختار شبیه‌ساز باران انجام شد (خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۱۶). با آزمایش‌های پرشمار و با استفاده دو

مشخصات دستگاه شبیه‌ساز باران

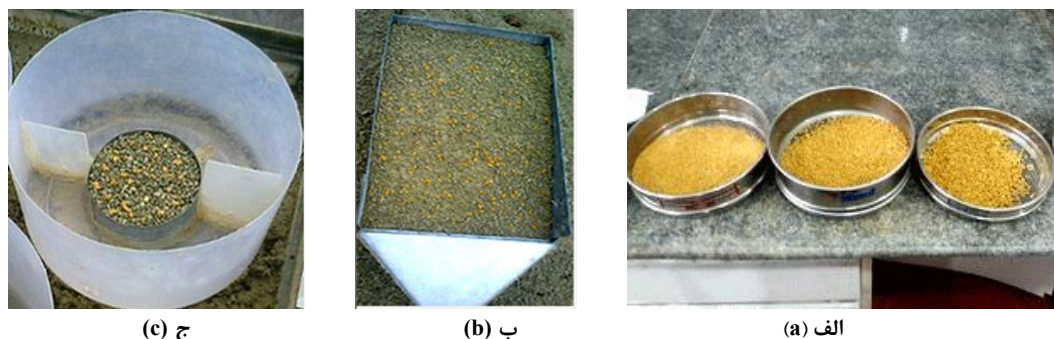
شبیه‌ساز باران که در این پژوهش استفاده شد از نوع تحت فشار بود که بلندای ریزش قطرات باران به وسیله آن ۲/۵ متر بود که برای دسترسی نسبی به سرعت حد قطرات مناسب بود (خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۱۶).

نازل استاندارد شرکت BEX شرایط بارش فراهم شد. همچنین، فشارهای گوناگون از نظر شدت، توزیع یکنواخت، قطر قطره و پوشش زمینی واسنجی شد (خالدی درویشان و همکاران ۲۰۱۶).

آماده سازی کرت ها و فنجان های پاشمان و اجرای آزمایش
از روش پیشنهاد شده به وسیله کوکال و سرکار (۲۰۱۱) برای آماده سازی نمونه های خاک استفاده شد. به این منظور ابتدا نمونه های خاک هوا خشک شد و بقایای گیاهی، سنگ و سنگ ریزه آن جدا شد. سپس، برای جداسازی خاکدانه های طبیعی خاک با قطرهای ۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵ میلی متر به ترتیب از الک هایی با شماره مش ۴، ۶، ۸ و ۱۶ (شکل ۲ الف) و با رطوبت حجمی ۳۰٪ استفاده شد (خالدی درویشان و همکاران ۲۰۱۴). خالدی درویشان و همکاران (۲۰۲۳). در این پژوهش، از سه کرت کوچک مکعبی با ابعاد ۴۰×۲۰ و با بلندی ۱۵ سانتی متر (شکل ۲ ب) و فنجان پاشمان طرح مورگان با کمی تغییر (خالدی درویشان و همکاران ۲۰۱۲) استفاده شد (شکل ۲ ج). برای شبیه سازی بهتر شرایط طبیعی، یک لایه ۱۵ سانتی متری پوکه معدنی در زیر خاک آزمایش ریخته شد (داربوکس و همکاران ۲۰۰۱، دفرشا و همکاران ۲۰۱۱، صادقی و همکاران ۲۰۱۵). سپس، خاک ها با قطرهای جداسازی شده هر کدام تا رسیدن به جرم مخصوص ظاهری نمونه آزمایشی دست نخورده (۱/۲۵ گرم بر سانتی متر مکعب) به آرامی و به شکلی که خاکدانه ها نشکنند، غلطک زده شدند (کاموبرکو و همکاران ۱۹۹۶، خالدی درویشان و همکاران ۲۰۱۴، خالدی درویشان و شریفی ۲۰۱۶). سپس، خاکدانه های رنگی دست ساز از ترکیب ذرات دانه ریز پوکه معدنی سفید با قطرهای یک تا پنج میلی متر به عنوان ذرات پایه همراه با سیمان سفید و پودر بتن زرد رنگ تهیه شده از شرکت آلمانی Lanxess

تهیه شدند. سپس، خاکدانه های رنگی دست ساز به تعداد ۲۰۰ عدد و به شکل یکنواخت در سطح کرت پخش شدند و غلطک به آرامی و به شکلی که خاکدانه ها نشکنند روی سطح خاک کرت حرکت داده شد تا خاکدانه های رنگی دست ساز به شکل یکنواخت در درون خاک و در میان خاکدانه های طبیعی خاک قرار بگیرند (خالدی درویشان و شریفی مقدم ۲۰۱۶). نکته مهم در این روش این بود که خاکدانه های رنگی دست ساز باید در یک میلی متری سطح خاک قرار بگیرند (توری و پوسن ۱۹۹۲).

فرسایش پاشمانی خاک با استفاده از فنجان پاشمان طرح مورگان (مورگان ۱۹۷۸، نانکو ۲۰۰۸) با اندکی تغییر در ابعاد آن اندازه گیری شد (خالدی درویشان و همکاران ۲۰۱۲). سپس، به منظور اندازه گیری و صحت سنجی خاکدانه های رنگی برای برآورد فرسایش پاشمانی در فنجان های پاشمان حاوی خاکدانه های طبیعی با قطرهای مدنظر به تعداد ۳۰ عدد خاکدانه رنگی دست ساز با قطرهای متناسب و هم اندازه با قطر خاکدانه های طبیعی روی سطح خاک اضافه شد (مرتنز و السن ۲۰۰۶). نکته مهم در این روش این است که خاکدانه های رنگی دست ساز باید در یک میلی متری سطح خاک قرار بگیرند و سطح خاک درون فنجان به آرامی غلطک زده شد به شکلی که خاکدانه ها نشکنند (توری و پوسن ۱۹۹۲، خالدی درویشان و شریفی مقدم ۲۰۱۶) تحت شبیه ساز باران در سه تکرار برای هر قطر قرار گرفتند. همچنین، به منظور تأمین شرایط رطوبت پیشین خاک و متناسب با شرایط طبیعی، کرت های آماده شده به مدت ۲۴ ساعت با ژرفای ۱۰ سانتی متر تحت شرایط اشباع بودند و بعد از این مرحله به مدت ۲۴ ساعت در هوای آزاد رها شدند تا رطوبت نزدیک به رطوبت مزرعه شود (کوکال و سرکار ۲۰۱۱).



شکل ۲- جداسازی ذرات خاکدانه رنگی دست ساز به وسیله الک (الف)، خاکدانه های رنگی دست ساز روی سطح کرت (ب) و خاکدانه های رنگی دست ساز در درون ظرف پاشمان (ج).

Figure 2- Separation of synthetic colour-contrast aggregates particles by sieve (a), synthetic colour-contrast aggregates on the surface of the plot (b) and synthetic colour-contrast aggregates inside the splash container (c)

رنگی دست‌ساز با شرایط ثابت و مشابه پیشین، اندازه‌گیری ذرات خاک پاشمان‌یافته در قسمت‌های بالادست و پایین‌دست فئجان جمع‌آوری شد. سپس، نمونه‌ها مشابه روش پیشین اندازه‌گیری شدند (خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۱۶). سپس داده‌ها در نسخه ۲۰۱۳ نرم‌افزار Excel جمع‌آوری و ثبت شدند و برای تحلیل آماری از نسخه ۲۲ نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

نتایج و بحث

به‌منظور بررسی صحت‌سنجی استفاده از خاکدانه‌های رنگی در برآورد فرسایش سطحی و پاشمانی، اندازه رسوب خروجی و تعداد خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز موجود در رسوب خروجی از کرت، از سطح کرت‌ها و فئجان‌های پاشمان اندازه‌گیری شد. نتایج فرسایش سطحی و پاشمانی برای هر سه قطر (۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵) در جدول‌های ۲ و ۳ آورده‌شده است.

پس از شبیه‌سازی باران به مدت ۱۰ دقیقه و پس از شروع رواناب از کرت‌ها، نمونه‌های رواناب و رسوب با استفاده از روش تخلیه آب (صادقی و همکاران ۲۰۱۵، غلامی و همکاران ۲۰۱۶) اندازه‌گیری شدند. سپس، نمونه‌های رواناب و رسوب به مدت ۲۴ ساعت به حالت سکون رها شدند و پس از تخلیه آب، رسوب ته‌نشین‌شده با آب مقطر به درون ظرف‌های آلومینیومی با وزن مشخص منتقل شد و به مدت ۲۴ ساعت در کوره با دمای 105°C خشک شدند. با توزین نمونه‌های رسوب و کسر وزن ظروف آلومینیومی، وزن رسوبات در حجم مشخصی از رواناب محاسبه شد (والینگ و همکاران ۲۰۰۱). سرانجام با شمارش چشمی تعداد خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز فرسایش‌یافته (به‌دلیل تعداد کم خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز در فرسایش سطحی و پاشمانی) به نسبت کل آن و وزن رسوب خروجی از کرت صحت‌سنجی برآورد شد. همچنین، برای برآورد و صحت‌سنجی فرسایش پاشمانی با استفاده از خاکدانه‌های

جدول ۲- نتایج فرسایش سطحی با استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز.

Table 2- The results of surface erosion using synthetic colour-contrast aggregates method.

Soil aggregate diameter	Replication	Sediment mass (gr)	Number SCCA (before rainfall)	Number SCCA (after rainfall)	SCCA reduction ratio	EA (cm ²)	EV (cm ³)	EM (gr)	Sediment yield (gr/m ²)
1.77	1	11.63	200	184	0.08	800	80	98	96.92
	2	9.223	200	186	0.07	700	70	85.75	76.86
	3	13.232	200	181	0.95	950	95	116.38	110.29
	Average	11.36	200	183.66	0.081	816.66	81.66	100.04	94.69
	S.D.	2.02	0	2.52	0.081	125.83	12.58	15.41	16.83
2.89	1	7.806	200	193	0.035	350	35	42.88	65.05
	2	11.048	200	191	0.045	450	45	55.13	92.07
	3	11.106	200	188	0.06	600	60	73.50	92.55
	Average	9.98	200	190.66	0.046	466.66	46.66	57.17	83.22
	S.D.	1.89	0	2.52	0.01	125.83	12.58	15.41	15.74
4.05	1	5.855	200	194	0.03	300	30	36.75	48.79
	2	4.094	200	197	0.015	150	15	18.38	34.12
	3	5.246	200	196	0.02	200	20	24.50	43.72
	Average	5.065	200	195.66	0.021	216.66	21.66	26.54	42.2
	S.D.	0.89	0	1.53	0.01	76.38	7.64	9.36	7.45

SCCA: خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز، EA: ناحیه فرسایش‌یافته، EV: حجم فرسایش‌یافته و EM: جرم فرسایش‌یافته

SCCA: Synthetic colour-contrast aggregates, EA: eroded area, EV: eroded volume and EM: eroded mass

جدول ۳ - نتایج فرسایش پاشمانی با استفاده از خاکدانه های رنگی دست ساز.

Table 3- The results of splash erosion using synthetic colour-contrast aggregates method

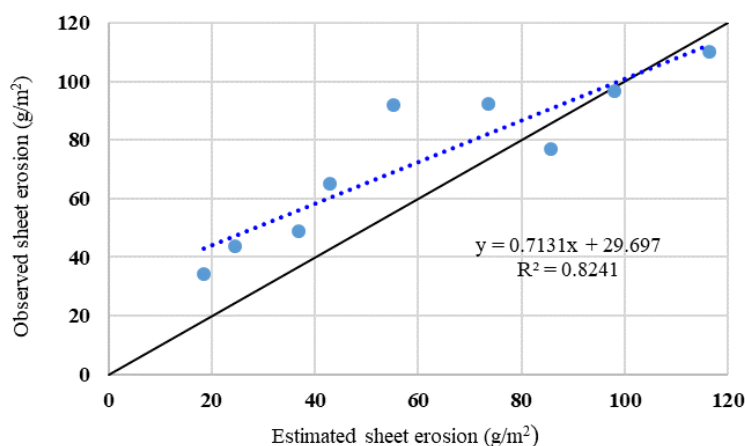
Soil aggregate diameter	Replication	Upstream splash (gr)	Downstream splash (gr)	Total splash (gr/m ²)	Net splash (gr)	Net splash (gr/m ²)	SCCA (before rainfall)	Upstream SCCA (after rainfall)	Downstream SCCA (after rainfall)	Total SCCA (after rainfall)	SCCA reduction ratio	EA	EV	EM	Correction coefficient
1.77	1	0.396	1.125	209.81	0.855	108.92	30	1	6	23	0.23	2333.33	233.33	285.83	86.62
	2	0.369	0.866	157.32	0.497	63.31	30	1	5	24	0.20	2000.00	200.00	245.00	74.24
	3	0.635	1.019	210.70	0.384	48.92	30	1	3	26	0.13	1333.33	133.33	163.33	49.49
Average		0.466	1.045	192.61	0.578	73.72	30	1	4.66	24.33	0.18	1888.89	188.89	231.39	70.12
S.D.		0.146	0.194	30.56	0.246	31.32	0	0	2	2	0.05	509.18	50.92	62.37	18.90
2.89	1	0.185	0.323	64.71	0.138	17.58	30	0	3	27	0.10	1000.00	100.0	122.50	37.12
	2	0.077	0.345	53.76	0.268	34.14	30	1	4	25	0.17	1666.67	166.67	204.17	61.87
	3	0.153	0.659	103.44	0.506	64.46	30	1	3	26	0.13	1333.33	133.33	163.33	49.49
Average		0.138	0.442	73.97	0.304	38.73	30	0.66	3.33	26	0.13	1333.33	133.33	163.33	49.49
S.D.		0.055	0.188	26.10	0.187	23.77	0	1	1	1	0.03	333.33	33.33	40.83	12.37
4.05	1	0	0	0	0	0	30	0	0	30	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	30	0	0	30	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	30	0	0	30	0	0	0	0	0
Average		0	0	0	0	0	30	0	0	30	0	0	0	0	0
S.D.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.05	1	0.093	0.248	43.44	0.155	19.75	30	0	0	30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.105	0.301	51.72	0.196	24.97	30	0	0	30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0.082	0.218	38.22	0.134	17.32	30	0	1	29	0.03	333.33	33.33	40.83	12.37
Average		0.093	0.255	44.46	0.162	20.68	30	0	0.33	29.66	0.01	111.11	11.11	13.61	4.12
S.D.		0.012	0.042	6.81	0.031	3.91	0	0	1	1	0.02	192.45	19.25	23.58	7.14

SCCA: خاکدانه های رنگی دست ساز، EA: ناحیه فرسایش یافته، EV: حجم فرسایش یافته و EM: جرم فرسایش یافته

SCCA: Synthetic colour-contrast aggregates, EA: eroded area, EV: eroded volume and EM: eroded mass

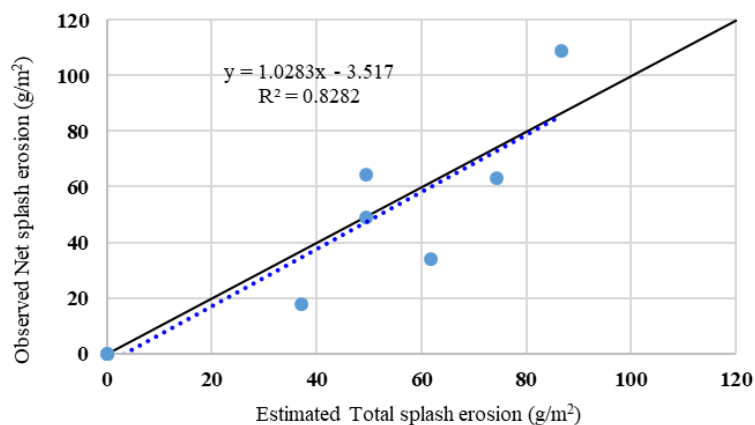
نمودارهای رابطه فرسایش پاشمانی و سطحی
نشان داده شده است. همچنین، نمودارهای جعبه ای مربوط
به فرسایش پاشمانی در شکل ۶ نشان داده شده است.

نمودارهای رابطه فرسایش پاشمانی و سطحی
اندازه گیری شده و برآورد شده در شکل های ۴، ۳ و ۵

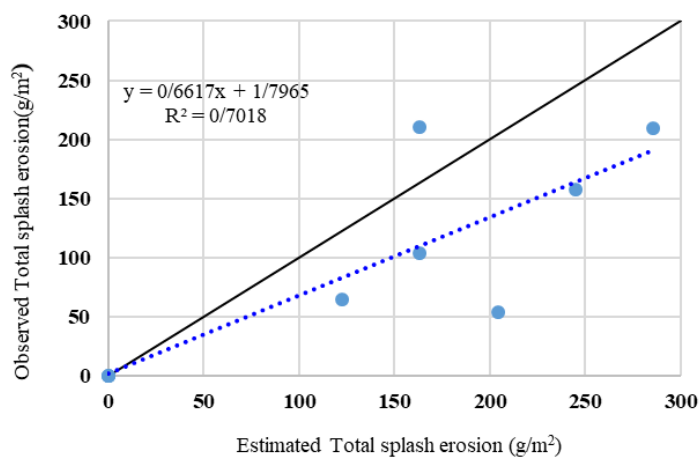


شکل ۳- رابطه میان فرسایش سطحی اندازه گیری شده و برآورد شده با استفاده از خاکدانه های رنگی دست ساز.

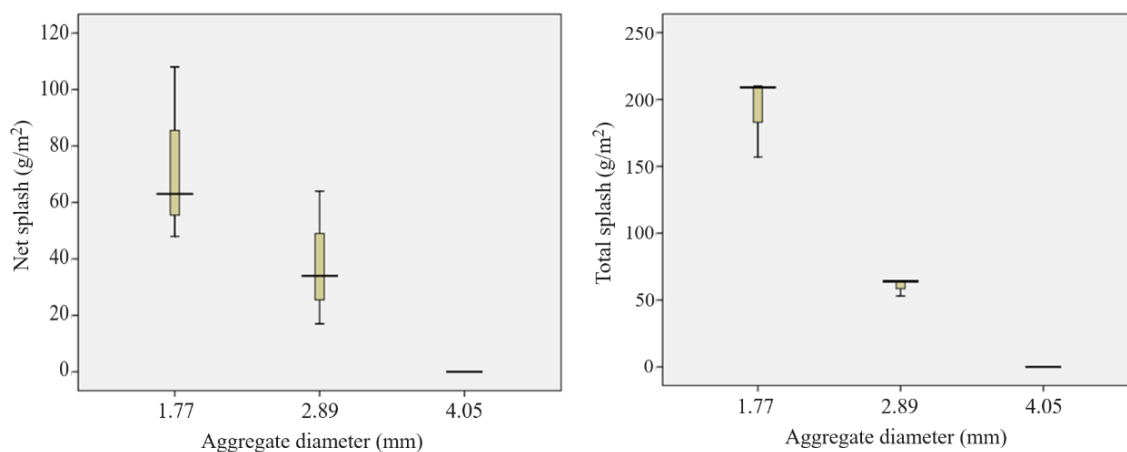
Figure 3- Relationship between observed and estimated surface erosion using synthetic colour-contrast aggregates.



شکل ۴- رابطه میان پاشمان خالص اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز.
Figure 4- Relationship between observed and estimated net splash using synthetic colour-contrast aggregates.



شکل ۵- رابطه میان پاشمان کل اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز.
Figure 5- Relationship between observed and estimated total splash using synthetic colour-contrast aggregates.



شکل ۶- نمودارهای جعبه‌ای پاشمان خالص و پاشمان کل در قطرهای گوناگون خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز.
Figure 6- Boxplots of net and total splash in various synthetic colour-contrast aggregate diameters.

خاکدانه طبیعی خاک، ضریب کاهش خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز بیشتر بود و در قطرهای ۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵ میلی‌متر میانگین ضریب کاهش خاکدانه‌های رنگی به ترتیب ۰/۰۸۱، ۰/۰۴۶ و ۰/۰۲۱ به دست آمد (جدول ۳). میانگین تعداد خاکدانه‌های رنگی جابه‌جاشده در پاشمان پایین دست برای قطرهای ۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵ میلی‌متر خاکدانه به ترتیب ۴/۶۶، ۳/۳۳ و ۰/۳۳ به دست آمد در حالی که این نسبت برای پاشمان بالادست به ترتیب ۱، ۰/۶۶ و صفر به دست آمد. نتایج نشان داد پاشمان و انتقال خاکدانه‌های رنگی مصنوعی در جهت پایین دست بیش‌تر از بالادست بود که با نتایج خالدی‌درویشان و همکاران (۲۰۲۳) نیز هماهنگی دارد.

بر اساس نمودارهای شکل ۴ و ۵ مشخص شد که رابطه میان پاشمان خالص و کل اندازه‌گیری‌شده (گرم در مترمربع) با فرسایش پاشمان خالص و کل برآوردشده (گرم در مترمربع) به وسیله خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز خطی و با ضریب تبیین به ترتیب ۸۲ و ۷۰٪ است. نتایج نشان داد که با افزایش قطر خاکدانه‌ها، اندازه فرسایش کل و خالص کاهش یافت. همچنین، الگوی پراکنش جعبه پلات‌ها بیانگر آن بود که در قطرهای کم (قطر ۱/۷۷ میلی‌متر) تغییرات فرسایش زیاد بود ولی در قطر ۴/۰۵ میلی‌متر خاکدانه با توجه به شکل جعبه پلات و به دلیل افزایش فیزیکی وزن ذره، جدایش‌پذیری با افزایش اندازه خاکدانه‌ها کاهش یافت (شکل ۶). نتایج این پژوهش با یافته‌های لگودویس و همکاران (۲۰۰۵) و وندایک و همکاران (۲۰۰۲) که نشان دادند با افزایش قطر خاکدانه، اندازه پاشمان کاهش یافت، هماهنگی دارد. در این راستا، خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۲۳ گزارش کردند میانگین اندازه پاشمان کل و خالص با افزایش قطر خاکدانه‌های طبیعی خاک و خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و با افزایش قطر از ۱/۷۷ به ۴/۵ میلی‌متر (حدود ۲ برابر)، اندازه پاشمان کل و خالص به ترتیب ۶/۱ و ۵/۴ برابر برای خاکدانه‌های طبیعی و دست‌ساز کاهش یافت.

دلیل این موضوع اندازه مقاومت برشی در مقابل برخورد قطرات باران است که در خاکدانه‌های درشت مقاومت برشی بیش‌تر از خاکدانه‌های ریز است. از این‌رو، پاشمان با افزایش قطر کاهش یافت (رفاهی ۲۰۰۶، چو و همکاران ۲۰۱۸). همچنین، انرژی قطرات باران پس از برخورد با خاکدانه‌های درشت‌تر، بیش‌تر صرف تلاشی کردن خاکدانه و جدا شدن ذرات خاک از هم می‌شود (ساترلند و همکاران ۱۹۹۶).

برای درک بهتر متغیرهای فرسایش سطحی و پاشمانی در واحد سطح، واحد داده‌ها از گرم در سطح کرت و سطح فنجان پاشمان به گرم در مترمربع تبدیل شد. بر اساس نتایج فرسایش سطحی، میانگین وزن رسوب (گرم بر مترمربع) برای قطرهای ۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵ میلی‌متر خاکدانه به ترتیب ۹۴/۶۹، ۸۳/۲۲ و ۴۲/۲ گرم بر مترمربع به دست آمد. این نتایج نشان داد که فرسایش سطحی با افزایش قطر خاکدانه‌های سطح خاک کاهش یافت (جدول ۲).

این یافته‌ها با نتایج پژوهش خالدی‌درویشان و همکاران (۲۰۱۴) هم‌راستا است. همچنین، برای قطرهای ۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵ میلی‌متر خاکدانه، میانگین ضریب کاهش خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز در فرسایش سطحی به ترتیب ۰/۰۸۱، ۰/۰۴۶ و ۰/۰۲۱ به دست آمد که متقابلاً کاهش فرسایش سطحی با افزایش قطر خاکدانه‌های سطح خاک را تأیید می‌کند. نتایج بررسی فرسایش سطحی اندازه‌گیری‌شده و فرسایش سطحی برآوردشده با استفاده از خاکدانه‌های رنگی نشان داد که رابطه میان فرسایش سطحی برآوردشده (گرم در مترمربع) با فرسایش سطحی اندازه‌گیری‌شده (گرم در مترمربع) خطی با ضریب تبیین ۰/۸۲ بود (شکل ۳). همچنین، بر اساس نتایج به دست آمده، افزایش قطر خاکدانه‌ها موجب کاهش چشم‌گیر حجم رسوبات شد.

در پژوهشی موحدان و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند خاکدانه‌های با قطر بزرگ‌تر به دلیل پیوندها و زنجیره‌های مولکولی طولی‌تر در مقابل فرسایش آبی مقاوم‌تر بودند و حجم رسوبات کم‌تری تولید کردند. نتایج این پژوهش با یافته‌های این پژوهشگران هم‌راستا است.

بر پایه نتایج جدول ۳ میانگین اندازه پاشمان خالص برای قطرهای ۱/۷۷، ۲/۸۹ و ۴/۰۵ میلی‌متر خاکدانه به ترتیب ۷۳/۷۲، ۳۸/۷۳ و ۲۰/۶۸ گرم بر مترمربع بود. همچنین، میانگین پاشمان کل برای قطرهای نامبرده به ترتیب ۱۹۲/۶۱، ۷۳/۹۷ و ۴۴/۴۶ به دست آمد. این نتایج بیانگر کاهش میانگین اندازه پاشمان خالص و پاشمان کل با افزایش قطر خاکدانه‌ها است. این نتایج با پژوهش‌های لگودویس و همکاران (۲۰۰۵) و خالدی‌درویشان و همکاران (۲۰۲۳) که نشان دادند با افزایش قطر خاکدانه‌ها فرسایش پاشمانی کاهش یافت، مطابقت دارد. دلیل این موضوع آن است که قطرات باران می‌توانند ذرات با قطر کمتر از ۲ میلی‌متر را جدا کنند، در حالی که ذرات درشت‌تر را نمی‌توانند جدا کنند. از این‌رو، ذرات با قطر بیش‌تر از ۲ میلی‌متر سست و مستعد به فرسایش سطحی می‌شوند. افزون بر این، در قطر ۴/۰۵ میلی‌متر

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

امروزه یکی از مشکلات اساسی در اکثر کشورها بحث فرسایش و رسوب است و از آنجایی که خاک به‌عنوان اصلی‌ترین عامل تولید غذا در جهان شناخته‌شده است، از این‌رو، برآورد دقیق شدت فرسایش برای موفقیت برنامه‌های حفاظت خاک در راستای دستیابی به توسعه پایدار ضروری است. نتایج این پژوهش بیانگر آن بود که روش اندازه‌گیری فرسایش سطحی و پاشمانی به‌وسیله خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز افزون بر کاهش هزینه‌ها، صحت و دقت قابل قبولی داشتند. از مهم‌ترین نتایج این پژوهش می‌توان به رابطه معکوس میان میانگین اندازه پاشمان خالص و پاشمان کل با قطر خاکدانه رنگی دست‌ساز و رابطه مستقیم میان فرسایش پاشمانی خالص و کل اندازه‌گیری‌شده و برآوردشده در خاکدانه

رنگی دست‌ساز به‌شکل مشابه با خاکدانه‌های طبیعی اشاره کرد. به بیان دیگر می‌توان گفت در هر دو خاکدانه طبیعی و دست‌ساز پاشمان خالص و پاشمان کل با افزایش اندازه خاکدانه‌ها، کاهش یافت. از سوی دیگر، برای استفاده از خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز به دست‌کاری سطح خاک، مانند آنچه در نصب فنجان پاشمان رخ می‌دهد، نیازی نیست و نمونه‌برداری از رواناب و رسوب خروجی کرت برای محاسبه هدررفت خاک از کرت، لازم نیست. از این‌رو، با توجه به مزیت‌های برشمرده و هزینه بسیار کم روش خاکدانه‌های رنگی دست‌ساز در مقایسه با دیگر روش‌ها، پیشنهاد می‌شود برای برآورد غیرمستقیم فرسایش پاشمانی و فرسایش سطحی در پژوهش‌های میدانی و آزمایشگاهی از این روش استفاده شود.

فهرست منابع

- Assouline, S. 2011. Soil Surface Sealing and Crusting. In: Gliński, J., Horabik, J., Lipiec, J. (eds), Encyclopedia of Agrophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. pp. 786-791. Doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1_156
- Baliani A, Vaezi A. 2017. The susceptibility of different texture soils to splash erosion under different rainfall intensity and antecedent water content. Journal of Water and Soil Conservation. 24(2): 67-85. (In Persian). Doi.org/ 10.22069/jwfs.2017.3676
- Bayramin IO, Baskan D, Parlak M. 2003. Soil erosion risk assessment with ICONA model. Case study: Beypazarı Area. Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 27(2): 105-116.
- Borrelli P, Alewell C, Alvarez P, Anache JAA, Baartman J, Ballabio C, Bezak N, Biddoccu M, Cerda A, Chalise D, Chen S, Chen W, Maria De, Girolamo A, DestaGessesse G, Deumlich D, Diodato N, Efthimiou N, Erpul G, Fiener P, Freppaz M, Panagos P. 2021. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. Science of the Total Environment. 780: 146494. Doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494
- Burylo M, Dutoit T, Rey f. 2014. Species traits as practical tools for ecological restoration of marly eroded lands. Restoration Ecology. 22(5): 633-640. Doi.org/10.1111/rec.12113
- Choo H, Park KH, Won J, Burns SE. 2018. Resistance of coarse-grained particles against raindrop splash and its relation with splash erosion. Soil and Tillage Research .184: 1-10. Doi.org/10.1016/j.still.2018.06.009
- Darboux F, Davy P, Gascuel-Odoux C, Huang C. 2002. Evolution of soil surface roughness and flow path connectivity in overland flow experiments. Catena. 46(2-3):125-139. Doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00162-X
- Deasy C, Quinton JN. 2010. Use of rare earth oxides as tracers to identify sediment source areas for agricultural hillslopes. Solid Earth. 1(1): 111-118. Doi.org/10.5194/se-1-111-2010
- Defersha, MB, Quraishi S, Melesse A. 2011. The effect of slope steepness and antecedent moisture content on interrill erosion, runoff and sediment size distribution in the highlands of Ethiopia. Hydrology and Earth System Sciences. 15(7): 2367-2375. Doi.org/10.5194/hess-15-2367-2011
- Deviren Saygin S, Erpul G. 2012. Interactive assessment of the splash erosion and aggregate breakdown mechanism for the soils of different semi-arid land uses. In EGU General Assembly Conference Abstracts. 786 p.
- Gholami L, Sadeghi SHR, Homae M. 2016: Different effects of sheep manure conditioner on runoff and soil loss components in eroded soil. Catena. 139: 99-104. Doi.org/10.1016/j.catena.2015.12.011
- Giovannini G, Vallejo R, Lucchesi S, Bautista S, Ciompi S, Llovet J. 2001. Effects of land use and eventual fire on soil erodibility in dry mediterranean conditions. Forest Ecology and Management. 147(1): 15-23. Doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00437-0
- Grandinetti L, Cantero-Martínez C, Ramos MC. 2022. Aggregate stability and soil surface sealing in irrigated soils under no-tillage versus conventional tillage. Land Degradation and Development. 33(13): 2379-2389. Doi.org/10.1002/ldr.4316
- Hawke RM, Price AG, Bryan BR. 2006. The effect of initial soil water content and rainfall intensity on near-surface soil hydrologic conductivity: A laboratory investigation. Catena. 65(3): 237-246. Doi.org/10.1016/j.catena.2005.11.013
- Khaledi darvishan A, Homayonfar V, Sade-

- ghi SHR. 2016. Designing, construction and calibration of a portable rainfall simulator for field runoff and soil erosion studies. Iranian Journal OF Watershed Management Science and Engineering. 10(34): 105-112. (In Persian).
- Khaledi Darvishan A, Katebikord A, Gholami L, Filipovic M, Spalevic V. 2023. Evaluation of synthetic-colour-contrast aggregates for soil splash measurement. Journal of Environmental Protection and Ecology. 23(8): 3433-3439.
- Khaledi Darvishan A, Sadeghi SHR, Homaee M, Arabkhedri M. 2014. Measuring sheet erosion using synthetic colour-contrast aggregates. Hydrological Processes. 28(15): 4463-4471. Doi.org/10.1002/hyp.9956
- Khaledi Darvishan A, Sadeghi SHR, Homaee M, Arabkhedri M. 2021. Sediment budgeting in laboratory plots under rainfall simulation. Watershed Management Research Journal. 34(2): 15-31. (In Persian). Doi.org/10.22092/wmej.2020.123819.1164
- Khaledi Darvishan, A, H. Sadeghi SHR, Homaee M, Arab khedri M. 2014. Influence of start time and runoff coefficient on rainfall intensity and previous soil moisture in laboratory plots. Iranian Water Research, 8(15): 41-49 (In Persian).
- Khaledi Darvishan A, Sadeghi SHR, Homaee M, Arankhedri M. 2012. Potential use of synthetic colour-contrast aggregates and a digital image processing technique in soil splash measurements. IAHS Publication. 356: 364-368.
- Khaledi Darvishan A, Sharifi Moghadam E.2016. Effects of aggregate diameter on soil splash under laboratorial conditions. jwmseir. 10(32): 33-38 (In Persian).
- Khodadadi M, Alewell C, Mirzaei M, Ehssan-Malahat E, Asadzadeh F, Strauss P, Meusbürger K. 2023. Understanding deforestation impacts on soil erosion rates using ¹³⁷Cs, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, and ²¹⁰Pbex and soil physicochemical properties in western Iran. Journal of Environmental Radioactivity. 257: 107078. Doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.107078
- Kukul SS, Sarkar M. 2010: Splash erosion and infiltration in relation to mulching and polyvinyl alcohol application in semi-arid tropics. Archives of Agronomy and Soil Science. 56(6): 697-705. Doi.org/10.1080/03650340903208871
- Kukul SS, Sarkar M. 2011. Laboratory simulation studies on splash erosion and crusting in relation to surface roughness and raindrop size. Journal of the Indian Society of Soil Science. 59(1): 87-93.
- Laburda T, Krása J, Zúmr D, Devátý J, Vrána M, Zambon N, Doštal T. 2021. SfM-MVS Photogrammetry for splash erosion monitoring under natural rainfall. Earth Surface Processes and Landforms. 46(5): 1067-1082. Doi.org/10.1002/esp.5087
- Leguédais S, Planchon O, Legout C, Le Bissonnais Y. 2005. Splash projection distance for aggregated soils. Soil Science Society of America Journal. 69(1): 30-37. Doi.org/10.2136/sssaj2005.0030
- Li H, Guan Q, Sun Y, Wang Q, Liang L, Ma Y, Du Q. 2022. Spatiotemporal analysis of the quantitative attribution of soil water erosion in the upper reaches of the Yellow River Basin based on the RUSLE-TLSD model. Catena. 212: 106081. Doi.org/10.1016/j.catena.2022.106081
- Li Y, Li K, Cai L, Zhu D, Liu Z, Wei X. 2023. Assessment of soil redistribution in a typical karst catchment using ¹³⁷Cs. Journal of Environmental Radioactivity. 257: 107087. Doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.107087
- Liu J, Hu F, Xu C, Du W, Yu Z, Zhao S, Zheng F. 2022. Specific ion effects on soil aggregate stability and rainfall splash erosion. International Soil and Water Conservation Research. 10(4): 557-564. Doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.02.001
- Ma G, Li G, Mu X, Hou W, Ren Y, Yang

- M. 2022. Effect of raindrop splashes on topsoil structure and infiltration characteristics. *Catena*. 212: 106040. Doi.org/10.1016/j.catena.2022.106040
- Meena RS, Lal R, Yadav GS. 2020. Long-term impacts of topsoil depth and amendments on soil physical and hydrological properties of an Alfisol in central Ohio, USA. *Geoderma*. 363: 114164. Doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114164
- Mertens G, Elsen J. 2006. Use of computer assisted image analysis for the determination of the grain-size distribution of sands used in mortars. *Cement and Concrete Research*. 36(8): 1453-1459. Doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.004
- Morgan RPC. 1978. Field studies of rains plash erosion. *Earth Surface Processes*. 3(3):295-299. Doi.org/10.1002/esp.3290030308
- Movahedan M, Abbasi N, Keramati M. 2013. Effect of polyvinyl acetate polymer on stability of dry aggregates. *Iranian Journal of Soil Research*. 27(1): 71-83. (In Persian). Doi.org/10.22092/ijsr.2013.126225
- Nanko K, Mizugaki S, Onda Y. 2008. Estimation of soil splash detachment rates on the forest floor of an unmanaged Japanese cypress plantation based on field measurements of throughfall drop sizes and velocities. *Catena*. 72(3): 348-361. Doi.org/10.1016/j.catena.2007.07.002
- Parsons AJ, Onda Y, Noguchi T, Patin J, Cooper J, Wainwright J, Sakai N. 2014. The use of RFID in soil-erosion research. *Earth Surface Processes and Landforms*. 39(12): 1693-1696. Doi.org/10.1002/esp.3628
- Refahi H. 2015. Water erosion and its control. Fifth Edition. Tehran University Press. 671 p. (In Persian).
- Roy P, Pal SC, Chakraborty R, Saha A, Chowdhuri I. 2023. A systematic review on climate change and geo-environmental factors induced land degradation: Processes, policy-practice gap and its management strategies.- *Geological Journal*. 58(9): 3487-3514. Doi.org/10.1002/gj.4649
- Sadeghi SHR, Gholami L, Sharifi Moghadam E, Khaledi Darvishan A. 2015. Scale effect on runoff and soil loss control using rice straw mulch under laboratory conditions. *Solid Earth*. 6(1): 1-8. Doi.org/10.5194/se-6-1-2015
- Sadeghi SHR, Kalehhouei M, Noori A, Naderi Marangelu N, Havasi M, Payfeshoordeh A, Khairparast M, Mostafaei Younjali S, Pirooznia Z, Hamzeh Bibalani M. 2023. Spatial soil erosion risk at the Brimvand watershed in kermanshah province, Iran. *Water and Soil*. 37(3): 443-456. (In Persian). Doi.org/10.22067/jsw.2023.80775.1247
- Sadeghi SHR, Sharifi Moghadam E, Khaledi Darvishan A. 2016. Effects of subsequent rainfall events on runoff and soil erosion components from small plots treated by vinnasse. *Catena*. 138: 1-12. Doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.007
- Sun X, Miao L, Wang H, Chen R, Wu L. 2022. Bio-cementation for the mitigation of surface erosion in loess slopes based on simulation experiment. *Journal of Soils and Sediments*. 22(6): 1804-1818. Doi.org/10.1007/s11368-022-03190-3
- Sutherland RA, Wan Y, Ziegler AD, Lee CT, El-Swaify V. 1996. Splash and wash dynamics: an experimental investigation using an Oxisol. *Geoderma*. 69(1-2): 85-103. Doi.org/10.1016/0016-7061(95)00053-4
- Torri D, Poesen J. 1992. The effect of soil surface slope on raindrop detachment. *Catena* 19(6): 561-578. Doi.org/10.1016/0341-8162(92)90053-E
- Valette G, Prévost S, Lucas L, Léonard J. 2006. SoDA Project: A simulation of soil surface degradation by rainfall. *Computers and Graphics*. 30(4): 494-506. Doi.org/10.1016/j.cag.2006.03.016
- Walling DE, Collins AL, Sichinabula HA, Leeks GJL. 2001. Integrated assessment of catchment suspended sediment budgets, a Zambian example. *Land and Degradation Development*

- opment. 12(5): 387-415. Doi.org/10.1002/ldr.461
- Wang X, Qin X, Tan J, Yang L, Ou L, Duan X, Deng Y. 2023. Effect of the moisture content and dry density on the shear strength parameters of collapsing wall in hilly granite areas of South China. International Soil and Water Conservation Research. Doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.09.006
- Wang, X. 2022. Managing land carrying capacity: Key to achieving sustainable production systems for food security. Land. 11(4): 484. Doi.org/10.3390/land11040484
- Wei L, Zhang B, Wang M. 2007. Effects of antecedent soil moisture on runoff and soil erosion in alley cropping systems. Agricultural Water Management. 94(1): 54-62. Doi.org/10.1016/j.agwat.2007.08.007
- Zarei R, Khaledi Darvishan A. 2020. The role of surface sealing caused by subsequent rainfall in the runoff components at the Kojour watershed Mazandaran. Watershed Management Research Journal. 33(4): 77-93. (In Persian). Doi.org/10.22092/wmej.2020.123725.1161
- Zheng FL. 2005. Effects of accelerated soil erosion on soil nutrient loss after deforestation on the loess plateau. Pedosphere. 15(6): 707-715.



Fars Agricultural and Natural Resources
Research and Education Center



Agricultural Research, Education
and Extension Organization

Validation of the Use of Synthetic Colour-Contrast Aggregates for Estimating Splash and Surface Erosion

Reza Zarei ¹, Mostafa Adami ², Abdulvahed Khaledi Darvishan ^{3*}

1- Ph.D. Student, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

2- Ph.D. Student, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

3- Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Soil erosion is one of the most important environmental, natural resource and agricultural issues in the world. Soil splash is the initial stage following the impact of raindrops on the soil surface, leading to the breakdown of the soil aggregates and the detachment of soil particles, ultimately causing splash erosion. This process is followed by a decrease in soil permeability, an increase in runoff, and consequently, surface erosion. Therefore, the accurate estimation of splash and surface erosion is necessary for the success of soil conservation erosion control and reduction of natural hazards. In this regard, innovative methods have been developed that utilize photography and image processing techniques to estimate splash and surface erosion. The aim of this research was to validate the splash and surface erosion estimates using synthetic colour-contrast aggregates.

Materials and Methods

Synthetic colour-contrast aggregates were initially prepared using mineral pumice particles and yellow concrete colour. Then, soil with a silty-clay-loamy texture was sampled from the

Article Type: Research Article

***Corresponding Author E-mail:** a.khaledi@modares.ac.ir

Citation: Zarei, R., Adami, M., Khaledi Darvishan, A. 2024. Validation of the Use of Synthetic Colour-Contrast Aggregates for Estimating Splash and Surface Erosion. *Watershed Management Research*. 37(4): 119-134.

DOI: 10.22092/WMRJ.2024.364785.1573

Received: 23 January 2024, **Received in revised form:** 13 February 2024, **Accepted:** 18 March 2024

Published online: 01 January 2025

Watershed Management Research, VOL. 37, No.4, Ser. No:145, Winter 2025, pp. 119-134.

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



Marzanabad-Kandalus road bank, and natural and synthetic colour-contrast aggregates with diameters of 1.77, 2.89 and 4.05 mm were separated. Surface erosion was then measured in 20×40 cm plots. Additionally, splash erosion was measured using the splash cup method under a rainfall intensity of 60 mm hr⁻¹ lasting 10 min in three repetitions.

Results and Discussion

The results showed that the average rates of net splash for different soil aggregate diameters of 1.77, 2.89 and 4.05 mm, were 73.72, 38.73 and 20.68 g m⁻², respectively, and also the average rates of total splash were 192.61, 73.97, and 44.46 g m⁻², respectively. These results indicate a decrease in the average amount of net and total splash with increasing in the soil aggregate diameter. The results showed that synthetic colour-contrast aggregates demonstrate an acceptable efficiency in measuring net splash, total splash and surface erosion with coefficients of determination of 82, 70 and 82%, respectively. The results also showed that the average soil loss for different soil aggregate diameters of 1.77, 2.89, and 4.05 mm, was 94.69, 83.22, and 42.20 g m⁻², respectively. in other words, surface erosion decreased with an increase in the diameter of soil aggregates on the soil surface.

Conclusion and Suggestions

The results of this study indicate that using synthetic colour-contrast aggregates allows for a quicker and reasonably accurate estimation of splash and surface erosion at the plot scale. As this method does not require sampling runoff and sediment from the plot, it reduces the cost of erosion and sediment research. Additionally, the synthetic colour-contrast aggregates do not disturb the soil surface and are environmentally friendly. Therefore, it is recommended to use this method for indirect estimation of splash and surface erosion in field and laboratory studies.

Keywords: Rainfall simulator, runoff, sediment, splash cup, surface erosion



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آبخیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

بررسی تأثیرات خشک‌سالی بر کیفیت منابع آب سطحی پُل دختر

مسعود گودرزی^{۱*}، رحیم کاظمی^۲

- ۱ - دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
- ۲ - استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

درک کیفیت، کمیت و شیوه عرضه آب یک گام ضروری در بهینه‌سازی مصرف آن است. در سال‌های گذشته، ایران از خشک‌سالی‌های طولانی‌مدت آسیب‌دیده است و سالانه خسارت‌های قابل‌توجهی به نقاط گوناگون کشور وارد شده است. خشک‌سالی‌های شدید در مناطق خشک و نیمه‌خشک ناشی از دخالت‌های نامناسب انسانی است که باعث کاهش کمیت و کیفیت منابع آب سطحی در این مناطق شده است. به‌طور کلی اندازه بارش، دوره و شدت خشک‌سالی، وضعیت آب و هوایی، فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی از جمله عامل‌هایی هستند که تأثیر قابل‌توجهی بر کیفیت آب‌های سطحی دارند. به این منظور، پژوهشگران از نمایه‌های گوناگونی برای نظارت بر خشک‌سالی و تأثیر آن بر کیفیت آب استفاده کرده‌اند. از این‌رو، استفاده از روش‌های مناسب برای بررسی اثرات پدیده‌هایی مانند خشک‌سالی بر کیفیت آب‌های سطحی نیز لازم است. این یک ابزار برای منابع آب در شرایط حیاتی است. هدف اصلی این پژوهش شناسایی دوره‌های مرطوب و خشک و خشک‌سالی‌های رخ داده با استفاده از شاخص SPI بود. سپس، تأثیرپذیری سنج‌های کیفیت شیمیایی آب‌های سطحی در آبخیز کشکان در دوره‌های خشک‌سالی و تغییرات آنها در یک دوره ۳۵ ساله بررسی شد. در این راستا، فراوانی رخداد و شدت خشک‌سالی آب شناختی، اندازه و دامنه تغییرات آب‌دهی متأثر از خشک‌سالی‌ها در آبخیز مطالعه‌شده تعیین شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه‌شده بخشی از آبخیز کشکان با مساحت ۹۵۶۰ کیلومتر مربع بود که حدود ۲۲٪ سطح آبخیز کرخه بزرگ را در بر می‌گیرد و در فاصله ۹۵۰ کیلومتری جنوب غرب تهران در بخش زاگرس مرکزی است. در این پژوهش

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: massoudgoodarzi@yahoo.com

استناد: گودرزی، م.، کاظمی، ر. ۱۴۰۳. بررسی تأثیرات خشک‌سالی بر کیفیت منابع آب سطحی پُل دختر. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۷ (۴): ۱۳۵-۱۵۵.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2024.364593.1567

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۳، دوره ۳۷، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۴۵، زمستان ۱۴۰۳، صفحه‌های ۱۳۵ تا ۱۵۵.

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

© نویسندگان



سنجه‌های شیمیایی آب‌های سطحی اندازه‌گیری شد. سپس، دوره‌های رخداد خشک‌سالی هواشناسی، رابطه‌های میان این رخدادها و کیفیت آب‌های سطحی در استان لرستان تعیین شد. به این منظور کیفیت شیمیایی رودها در یک دوره ۳۵ ساله با داده‌های کیفیت موجود در ایستگاه‌های آب‌سنجی شامل آنیون‌ها (Cl^- ، SO_4^{2-} ، HCO_3^-) و کاتیون‌ها (Na^+ ، Mg^{2+} ، Ca^{2+} ، K^+) و متغیرهای دیگر شامل SAR، pH، TH، TDS و EC در دوره آماری مشترک (۱۹۸۱-۲۰۱۶) تجزیه و تحلیل شد. اگرچه امروزه برای تهیه داده‌های کیفیت آب چالش‌های زیادی وجود دارد، اما، خوشبختانه در این پژوهش طول دوره، تعداد نمونه‌برداری‌ها و همگنی داده‌ها و طول دوره مشترک، مناسب بود و با توجه به این‌که دوره مطالعه‌شده، شامل دوره‌های عادی، دوره‌های خشک و دوره‌های تر بود، کیفیت پژوهش نیز مناسب بود. همچنین، باید توجه داشت که شرکت توسعه منابع آب، به دلایل گوناگون صحت‌سنجی، همیشه چند سالی دیرتر داده‌ها را منتشر می‌کند. از این‌رو، امکان بررسی دوره آماری طولانی‌تر فراهم نشد. از سوی دیگر، گسترده‌ترین خشک‌سالی‌های منطقه، در این بازه زمانی رخ داده است.

نتایج و بحث

اگرچه سازندهای دولومیتی، آهکی و مارنی در کاهش کیفیت رواناب‌های سطحی عبوری از آنها نقش دارند، اما بر پایه نتایج این پژوهش، رخداد خشک‌سالی‌های گسترده و پرشمار نیز موجب افزایش غلظت املاح در واحد حجم شده است به‌شکلی که pH آب از ۷/۶۱ به ۷/۶۸ و EC آب از $300 \mu\text{m/cm}$ در سال ۱۹۸۱ به $570 \mu\text{m/cm}$ در سال ۲۰۱۶ افزایش یافت ولی هم‌چنان از نظر آبیاری در طبقه کیفیت مناسب بود. با استفاده از روش‌های هم‌بستگی و وایزی دو متغیره، ارتباط و اثرات میان متغیرهای مستقل کم‌آبی و پرآبی با متغیرهای وابسته مربوط به سنجه‌های کیفیت شیمیایی آب‌های سطحی آبخیز با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS و Excel بررسی شد. نتایج بررسی آنیون‌ها و کاتیون‌ها نشان داد که اندازه آنها در دوره‌های کم‌آبی و پرآبی در سطح ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار بود. اندازه شاخص‌های SAR و SSP و TH بیشتر در شرایط کم‌آبی معنی‌دار بود. همچنین، تغییرات اندازه EC در زمان کم‌آبی در همه سطوح معنی‌دار بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

به‌طور کلی خشک‌سالی‌ها ارتباط نزدیکی با بحران‌های آب و کاهش منابع آب‌های سطحی دارند. از این‌رو، بررسی تأثیر خشک‌سالی روی کمیت و کیفیت آب‌های سطحی با اهمیت است. با استفاده از نتایج این پژوهش‌ها می‌توان درک بهتری از عامل‌های مؤثر بر کیفیت آب‌های سطحی داشت. نتایج این پژوهش نشان داد آب‌های سطحی به‌رغم کاهش کیفی، هم‌چنان برای آبیاری در بخش کشاورزی مناسب است. پیشنهاد می‌شود نقش مصارف صنعتی و آلاینده‌های آب‌های سطحی نیز بررسی شود. به‌ویژه در زمینه ایستگاه‌هایی که در پایین‌دست مناطق مسکونی و صنعتی هستند، پایش تغییرات و نوع آلودگی اهمیت زیادی دارد.

واژگان کلیدی: آبخیز کشکان، اقلیم خشک و نیمه‌خشک، خشک‌سالی، کیفیت آب سطحی، نمایه SPI

مقدمه

کیفیت آب شرح کاملی از شرایط فیزیکی، شیمیایی و باکتری‌شناسی منابع آب است و بستگی به غلظت تمام مواد حل‌شده یا معلق در آب دارد (اهری ۲۰۰۱). به‌طوری که در بعضی شرایط این حساسیت چنان افزایش یافته که موجب بروز مناقشه‌های منطقه‌ای و بین‌المللی شده است (زاهدی ۲۰۰۵). اهمیت کیفیت آب از کمیت آن کمتر نیست اما در بررسی‌های بیلان آب آبخیزها، عموماً فقط به بیلان کمی توجه می‌شود و بیلان کیفی فراموش می‌شود. بخشی از این موضوع مربوط به تغییرپذیری مکانی و زمانی کیفیت منابع آب است که بررسی آن پیچیدگی خاص خود را دارد. مخاطره‌های اقلیمی از جمله رخداد

هر چند که بیش از سه چهارم کره زمین را آب فرا گرفته است اما بخش کمی از آب‌های موجود برای مصارف بهداشتی و کشاورزی قابل استفاده است، زیرا، آب اقیانوس‌ها، دریاها و بیشتر دریاچه‌ها و بسیاری از منابع آب زیرزمینی به‌علت شوری بیش از حد و داشتن املاح معدنی برای مصارف بهداشتی، کشاورزی و صنعتی غیرقابل استفاده است (علی‌زاده ۲۰۰۶). کیفیت آب نتیجه کلیه فرآیندها و واکنش‌هایی است که از زمان تشکیل و تراکم آب در جو تا زمانی که به زمین برسد و جاری شود یا به زیر زمین برود و دوباره از راه منابع چاه و چشمه خارج شود روی آن انجام‌شده است. به‌بیان دیگر

دوره‌های خشک در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از منابع آب تأثیر چشمگیر داشته است و در این رابطه برای بررسی آن لازم است شاخص‌های گوناگونی از جمله بارش بررسی شود (مصطفائی ۲۰۰۹). خشک‌سالی یکی از پدیده‌های محیطی و بخش جدایی‌ناپذیر تغییرات اقلیمی است. دوره‌های کم‌آبی می‌تواند به مشکلات این کشورها بیفزاید چرا که بر اثر کم‌آبی و خشک‌سالی، آب رودها کم و امکان دارد یک رود دائمی به رود فصلی و یا حتی به یک رود موقتی تبدیل شود یا کلاً خشک شود. به این ترتیب، با کاهش حجم آب در رودها زمینه کاهش کیفی آب نیز فراهم می‌شود (زاهدی ۲۰۰۵). این پدیده از ویژگی‌های اصلی و تکرارشونده اقلیم‌های گوناگون به‌شمار می‌آید. خشک‌سالی ممکن است در هر مکانی رخ دهد و باعث کمبود آب شود، اما ویژگی‌های آن از قبیل شدت، مدت و بزرگی خشک‌سالی و همچنین اثرات آن از محلی به محل دیگر متفاوت است. زمانی نسبتاً طولانی سپری شد تا بشر به اهمیت کیفیت آب پی برد (کارآموز و کراچیان ۲۰۰۸). خشک‌سالی آب‌شناختی نیز ممکن است موجب تغییرات قابل توجهی در کیفیت آب شود. هدف اصلی این پژوهش بررسی چگونگی تأثیر پذیری سنجه‌های کیفیت شیمیایی آب‌های سطحی در هنگام رخداد دوره‌های خشک‌سالی با استفاده از گام‌های زمانی بارش و آب‌دهی رودها، روند تغییرات بارش و آب‌دهی و دوره‌های خشک‌سالی و تداوم آنها (بر اساس یکی از شاخص‌های اقلیمی) بود (کاظمی و همکاران ۲۰۲۲). با توجه به اینکه خشک‌سالی یا کم‌آبی پدیده‌ای ذاتی در شرایط اقلیمی ایران است، پس طبیعتاً دوره‌های کم‌آبی به‌مراتب بیشتر از دوره‌های پرآبی است. بنابراین، بررسی نحوه تخصیص آب با کیفیت مطلوب در این شرایط (کم‌آبی) بسیار اهمیت دارد. به‌رغم اینکه استان لرستان جزء استان‌های نسبتاً پربارش کشور است اما، رخداد متناوب دوره‌های کم‌آبی، کاهش کمی و کیفی کلیه منابع آب استان از جمله آب‌های سطحی آبخیز کشکان را سبب شده است. به طوری که این کاهش کمی باعث تغییراتی نامطلوب در کیفیت شیمیایی مجموع آب‌ها به‌ویژه آب‌های سطحی در آبخیز کشکان شده است (لشنی‌زند ۲۰۰۱).

پژوهشگران پرشماری (برایمت و همکاران ۱۹۹۲)، (فیلیپ و مک‌گریگور ۱۹۹۸) و (گلداسمیت و همکاران ۱۹۹۷) با استفاده از کمبود تجمعی بارندگی ماهانه شدت خشک‌سالی‌های انگلستان را تجزیه و تحلیل کردند. نظریه (Run) به‌وسیله (جویج و یچ ۱۹۶۷) در تحلیل خشک‌سالی به‌کار گرفته شد. در جنوب کشور پرتغال باروس و مندو (۱۹۹۵) تأثیرات دوره‌های کم‌آبی و پرآبی

بر کیفیت شیمیایی آب‌های سطحی را بررسی کردند. آنها گزارش کردند که رابطه میان سنجه‌های کیفیت شیمیایی آب‌ها با آب‌دهی معنی‌دار بود. از سوی دیگر، شاخص‌های گوناگونی به‌وسیله پژوهشگران پرشماری به‌منظور ارزیابی و پایش خشک‌سالی پیشنهاد شده است که هر یک از این شاخص‌ها براساس به‌کارگیری متغیرهای هواشناسی و روش‌های محاسبه‌ای متفاوتی، طراحی شده‌اند (ریچارد و همکاران ۲۰۰۲). در پژوهشی احاراری رودی (۲۰۱۸)، با استفاده از داده‌های بارش و داده‌های کیفی ۲۷ حلقه چاه مشاهده‌ای که پراکنش مناسبی در سطح استان سیستان و بلوچستان داشتند، اثرات خشک‌سالی بر کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی این استان را در سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۳ بررسی کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که با توجه به کاهش بارش، میانگین کل عناصر و مواد در آب‌های زیرزمینی در دوره مطالعه‌شده ۲۰ تا ۲۵٪ در آب افزایش یافت. امیریان و همکاران (۲۰۰۹) اثرات خشک‌سالی بر کیفیت آب رود مارون را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد خشک‌سالی سال ۱۳۸۷ موجب کاهش کیفیت آب رود مارون شد و بیشترین تأثیر خشک‌سالی بر اندازه کدورت آب و افزایش کلر بود و کم‌ترین تغییرات در دمای آب و pH مشاهده شد. در پژوهشی بهرامی و همکاران (۲۰۰۹) کاهش کیفیت رود زهره را به کاهش آب‌دهی و وجود سازندهای شور در منطقه نسبت دادند. خشک‌سالی می‌تواند اثرات معنی‌داری بر کیفیت آب رودها داشته باشد. زمانی که جریان پایه کم است، شوری آب افزایش و کیفیت آب دست خوش تغییر می‌شود. در پژوهشی همایون‌زاده و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از نمودار شولر (۱۹۶۵) و ویلکاکس (۱۹۵۸) کیفیت آب چاه نیمه‌های شهرستان زابل برای مصارف شرب و کشاورزی را ارزیابی کردند.

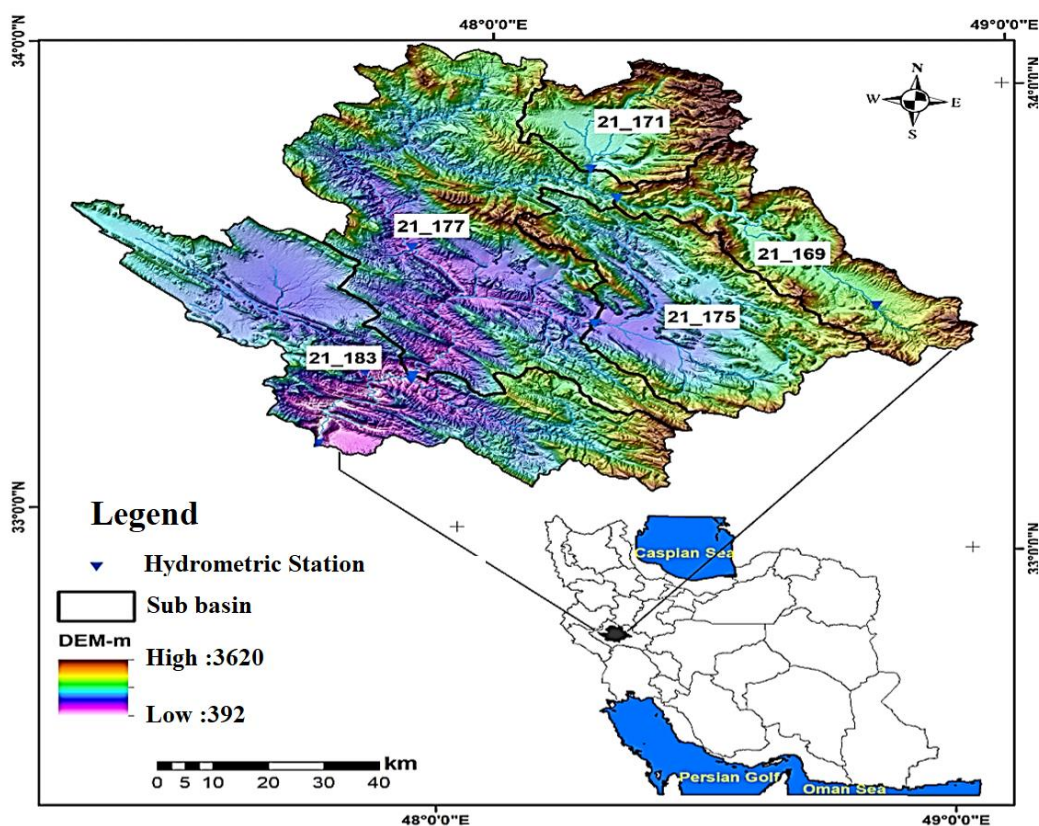
در شمال‌شرق کشور اسلواکی سبنیک و همکاران (۲۰۱۷) خشک‌سالی را با استفاده از شاخص بارندگی استاندارد (SPI) تجزیه و تحلیل کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد هم‌بستگی میان آب‌دهی استاندارد رود و شاخص بارندگی (SPI) معنی‌دار بود. (بهائی و همکاران ۲۰۱۹) پویایی کیفیت آب به‌منظور ارزیابی اثرات آن در کشور پاکستان را بررسی کردند. همچنین، سینگ و همکاران (۲۰۲۰) کیفیت آب زیرزمینی را به‌منظور اهداف کشاورزی ارزیابی کردند. در این پژوهش با استفاده از نمودار ویلکاکس طبقه‌بندی کیفی آب انجام شد. سپس، آلاینده‌های مؤثر بر کیفیت آب و اثرات ویران‌گر آن برای مصارف کشاورزی ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعه شده

آبخیز کشکان با مساحت بیش از ۹۵۶۰ کیلومتر مربع، حدود ۲۲٪ از کل آبخیز کرخه را در بر گرفته است. این در حالی است که آبخیز کرخه در میان آبخیزهای اصلی شش‌گانه ایران (۱- آبخیز دریای خزر ۲- آبخیز خلیج فارس و دریای عمان ۳- آبخیز بسته آذربایجان ۴- آبخیز مرکزی ایران ۵- آبخیز هیرمند و هامون ۶- آبخیز دشت قره‌قروم یا سرخس) در درون آبخیز خلیج فارس و دریای عمان است (خاک‌پور ۲۰۰۸). مختصات جغرافیایی آبخیز کشکان ۴۷°۱۲' تا ۴۸°۵۹' طول شرقی و ۳۳°۰۸' تا ۳۴°۰۲' عرض شمالی در بخش میانی سلسله کوه‌های زاگرس، در ۴۵۰ کیلومتری جنوب‌غرب تهران است. این آبخیز از نظر تقسیمات سیاسی، تماماً در استان لرستان است و شهرستان‌های خرم‌آباد، الشتر، کوهدشت و پل‌دختر با مساحتی حدود ۳۳٪ از کل استان در آبخیز نامبرده گسترش یافته‌اند. زیرآبخیز کشکان با مساحت ۲۵۴۶۶ کیلومتر مربع در محل خروجی ایستگاه آب‌سنجی ۱۸۳-۲۱ با نام پل‌دختر کشکان است. کمترین بلندی این آبخیز از سطح دریای

آزاد ۵۲۲ متر و بیشترین بلندی آن ۳۵۰۳ متر است. بلندی آبخیز از سطح دریا نشان‌دهنده موقعیت اقلیمی آن است (لشنی‌زند ۲۰۰۱). در آبخیزهای مناطق بلند نه تنها بارندگی پیش از آبخیزهای پست است بلکه در قله‌های بلند غالباً نزولات جوی به شکل برف است که آب‌شناسی آن با رگبارها متفاوت است. بلندی میانگین آبخیز یعنی اندازه‌ای که ۵۰٪ زمین‌های آبخیز بلندی‌شان بیشتر از آن اندازه و ۵۰٪ مساحت آبخیز بلندی‌شان کمتر از آن اندازه باشد (علی‌زاده ۲۰۰۶). از مؤلفه‌های قابل توجه در یک آبخیز اندازه جمعیت ساکن در آبخیز است که متأثر از پدیده خشک‌سالی و اثرات جانبی آن است. حدود ۱۴۵۰ قصبه روستا با جمعیت بیش از ۷۵۰ هزار نفر در پهنه آبخیز کشکان سکونت دارند و شهر پل‌دختر یکی از مهم‌ترین منابع شهری آبخیز کشکان به‌شمار می‌آید (لشنی‌زند ۲۰۰۱). نقشه موقعیت منطقه پژوهش و ایستگاه‌های آب‌سنجی و همدید منطقه مطالعه شده در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین، مشخصات زیرآبخیزهای بررسی‌شده در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه پژوهش و ایستگاه‌های آب‌سنجی و همدید منطقه.

Figure 1- map of the study area with hydrometric and synoptic stations in the area.

نیز ناشی از جریان‌های مرطوبی است که در بیش از نیمی از سال به همراه مرکز کم فشار به‌طور مستقیم از سمت غرب و پس از عبور از دریای مدیترانه و غنی شدن از بخار آب موجود روی دریا وارد این منطقه می‌شود (تلوری ۱۹۹۹). مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی مطالعه‌شده در سطح آبخیز کشکان در جدول ۱ آورده شده است.

بر اساس آمار ایستگاه‌های باران‌سنجی در سطح و پیرامون آبخیز نامبرده، میانگین سالانه بارندگی آبخیز ۶۱۹ میلی‌متر برآورد شد (لشنی‌زند ۲۰۰۱). وضعیت بارندگی آبخیز، وضعیت مدیترانه‌ای است. هم‌چنین توزیع بارندگی در فصل‌های گوناگون مبتنی بر ورود سامانه‌های بارش‌زا به منطقه است. بخش بزرگی از بارندگی منطقه

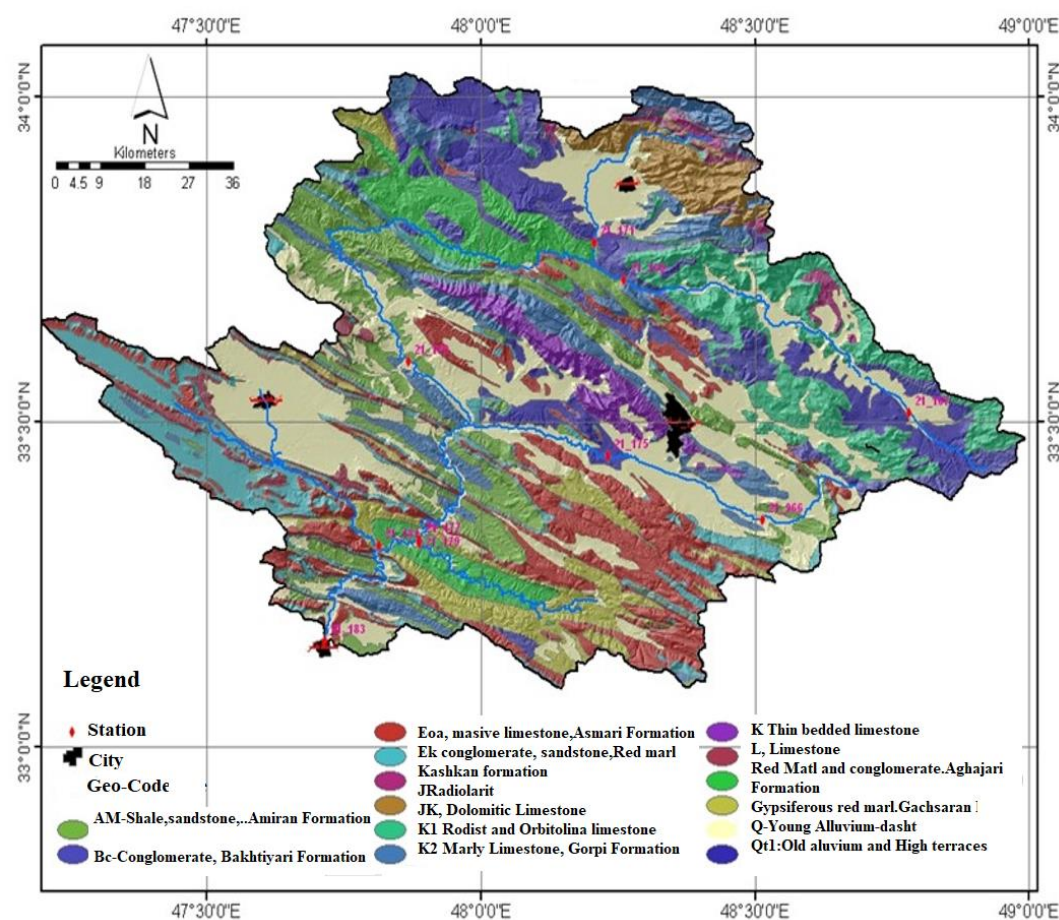
جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی مطالعه‌شده در سطح آبخیز کشکان.

Table 1- Hydrometric station attributes of the study area.

Station	River	Area (Km ²)	Geographic attributes			No. of samples
			Height	Lat.	Long.	
Afarineh	Cholhol	799.46	800	19-33	53-47	361
Afarineh	Mid-Kashkan	6931.28	820	20-33	53-46	223
Cham Anjir	Khoramabad	1718.5	1140	26-33	48-14	268
Kakareza	Har-rud	1204.91	1530	41-33	16-48	205
Sarab seyedali	Doab	797.46	1520	47-33	12-48	218
Pol-Kashkan	Pol-Kashkan	3763.76	1000	35-33	53-47	204
Bar aftar	Madian-rud	111.37	790	19-33	49-47	211
Poldokhtar	Lower Kashkan	9560	650	19-23	43-47	277

از آن عبور کرده است، بستگی دارد. با توجه به تأثیرات سازندهای زمین‌شناسی بر منابع آبی آبخیز، تلاش شد تا تصویری کامل از زمین‌شناسی آبخیز ارائه شود. نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعه‌شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

از جمله عوامل‌های مؤثر بر جریان، مؤلفه‌های گوناگون آبخیز شامل: زمین‌شناسی، پستی و بلندی سطحی و زیرسطحی، مشخصه‌های خاکشناسی و مؤلفه‌های اقلیمی و هم‌چنین دخالت‌های انسانی است. عبور آب از زمین‌های گوناگون سبب تغییرات فیزیکی و شیمیایی آن می‌شود و این تغییرات به خصوصیات زمین‌شناسی نقاطی که آب



شکل ۲ - نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعه‌شده (کاظمی و همکاران ۲۰۲۲ به نقل از اشتوکلاین (۱۹۶۸)).

Figure 2- Geologic map of the study area (Kazemi et al., 2022 after Stöckline (1968)).

در بخش‌های مختلف شرب، کشاورزی و صنعت می‌شود، اهمیت و ارزش بسیار زیادی دارند. به منظور تحلیل کیفیت آب از نظر شرب از نمودار شولر استفاده شد.

روش پژوهش

در این پژوهش آمار آب‌دهی روزانه آب‌های سطحی آبخیز نامبرده و آمار تحلیل سنج‌های کیفیت شیمیایی آن تهیه و بررسی شد. این آمارها، از ایستگاه‌های آب‌سنجی وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران، واحد مدیریت پایه منابع آب ایران جمع‌آوری شد. سپس، سنج‌های کیفیت آب شامل هدایت الکتریکی (EC)، قلیائیت (pH)، کل مواد جامد محلول (TDS)، سولفات (SO_4^{2-})، نسبت جذبی سدیم (SAR)، کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+)، کلر (Cl^-)، غلظت یون‌های بی‌کربنات (HCO_3^-) و سختی کل (TH) ایستگاه‌های آب‌سنجی آبخیز کشکان در یک دوره ۳۰ ساله به‌شکل روزانه استخراج شد. در این پژوهش پس از جمع‌آوری داده‌های آب‌دهی ایستگاه‌های

رخداد پی‌درپی دوره‌های کم‌آبی تا حدودی روی کیفیت شیمیایی آب‌های سطحی این آبخیز اثر گذاشته است و باعث به وجود آمدن مشکلات و محدودیت‌هایی در زمینه استفاده‌های گوناگون از این آب‌ها شده است. رخداد دوره‌های کم‌آبی افزون بر کاهش حجم آب‌های سطحی آبخیز، باعث شور و سنگین شدن و تغییر کمیت و کیفیت مواد موجود در آنها شده است (لش‌نی‌زند ۲۰۰۱). آبخیز مطالعه‌شده از نظر سنگ‌شناسی شامل سنگ‌ماسه، سنگ‌آهک، کنگلومرا، دولومیت و تا اندازه‌ای آذرین است. در جنوب و جنوب‌غربی آبخیز سنگ‌های فوق انیدریت و شیل نیز وجود دارد. همچنین در خروجی آبخیز، سازندهای گروه فارس از جمله سازند گچساران و آغاچاری برونزدگی دارد که حساس به فرسایش است و نقش مؤثری بر تغییر کیفیت آب دارد (مصطفائی ۲۰۰۹). در این پژوهش، سری‌های زمانی بارش روزانه و آب‌دهی در بازه زمانی ۳۵ ساله انجام شد. گام‌های زمانی داده‌های کیفیت آب نیز تهیه شد. از آنجایی که از آب‌های سطحی این آبخیز در داخل و خارج از استان استفاده‌های زیادی

بر کیفیت آب دارد. به طوری که کاهش اندازه بارندگی، دمای زیاد و شدت تبخیر سبب افزایش درجه غلظت املاح در آبها می شود.

کیفیت آب های سطحی به شدت تحت تأثیر شرایط آب شناختی هستند. به طوری که در فصل پرباران با افزایش آب دهی رودها غلظت املاح مختلف کاهش می یابد، در صورتی که در فصل خشک با کاهش آب دهی کیفیت آب به شدت کاهش می یابد (مصطفائی ۲۰۰۹). در این پژوهش، اندازه ضریب هم بستگی به دست آمده با اعداد جدول فیشور و درجه آزادی ($df = N - 2$)، در ستون احتمال مد نظر مقایسه شد. چنان چه ضریب به دست آمده بزرگتر و یا مساوی آن بود، هم بستگی در آن سطح اعتماد، معنی دار است. در شرایطی نیز می توان از هم بستگی چند متغیره، یا لگاریتمی و یا درجه دوم استفاده کرد (مهدوی ۲۰۰۵). به طور کلی کمترین طول دوره آماری لازم بستگی به این دارد که نتایج در چه سطح آماری قابل قبول باشند (علی زاده ۲۰۰۶). کالینز در سال ۱۹۲۳ اولین روش گرافیکی را که در آن غلظت هر یک از کاتیون ها و آنیون ها با رنگ یا طرح های گوناگون نشان داده شده بود، را در نموداری به نام نمودار بار ارائه داد (دفتر تحقیقات و معیارهای فنی سازمان برنامه و بودجه ۱۹۹۱).

در این پژوهش از دو مدل از این نمودارها به نام های شولر و ویلکاکس در راستای تعیین قابلیت های شرب و کشاورزی آب های سطحی تمام زیر آبخیزهای کشکان استفاده شد. در نمودار شولر، در رسم خطوط در شرایطی که اندازه های سنجها بر حسب میلی گرم در لیتر بود از اشل های مربوط به هر سنج استفاده شد و در شرایطی که بر حسب میلی اکی والان در لیتر بود از دو اشل سمت راست و سمت چپ نمودار، استفاده شد. به بیان دیگر، این روش تقسیم بندی کیفیت آب بر اساس نمودار شولر یک تقسیم بندی شش گانه شامل خوب، قابل قبول، متوسط، نامناسب، موقتاً قابل شرب و غیر قابل شرب تقسیم بود (علیزاده ۲۰۰۶). نمودار ویلکوکس در سال ۱۹۴۸ ارائه شد. این نمودار روشی بسیار متداول در طبقه بندی آبها از نظر کشاورزی، در پژوهش های آب شناسی است. در این نمودار محور افقی شوری آب (بر حسب میکروموس بر سانتی متر) و محور عمودی نسبت جذبی سدیم (SAR) است. مختصات مربوط به هر آب در منطقه ای است که با حرف C از نظر شوری و حرف S از نظر سدیم مشخص می شود. اندازه های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب نشان دهنده کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد است. اگر آبی در منطقه $C3S2$ باشد یعنی شوری این آب زیاد و سدیم آن متوسط است و یا آب $C1S2$ آبی با شوری کم و سدیم متوسط است. بر اساس طبقه بندی ویلکوکس

آب سنجی و جمع آوری آمار سنجهای کیفیت شیمیایی آب های سطحی تمام زیر آبخیزهای آبخیز کشکان، به منظور هم زمانی سال های آماری یک دوره شاخص ۳۰ ساله که دوره آماری مطلوبی از نظر طرح های آب شناختی بود، انتخاب شد. از آنجایی که داده های ایستگاه های گوناگون باید همگن باشند و با توجه به کیفیت آمارهای موجود با استفاده از روش های مختلف از جمله مقایسه نظری آمار هم زمان ایستگاه های مختلف و مهار اندازه های خیلی زیاد و یا خیلی کم، کیفیت همه آمارها تأیید شد. متأسفانه سازمان مدیریت منابع آب داده ها را با چند سال تأخیر تهیه می کند. امروزه، تهیه داده های با طول مدت مناسب و به روز با چالش های زیادی همراه است. با توجه به کیفیت و تعداد نمونه برداری ها، داده ها تا سال ۲۰۱۶ همگن، با کیفیت مناسب و در دسترس بودند. طول مدت دوره آماری نامبرده شامل دوره های عادی، دوره های خشک سالی و ترسالی بود. از آنجایی که درستی و نادرستی آمارها وابسته به آزمون همگنی است، بنابراین، این آزمون روی داده های موجود انجام شد. برای ارزیابی همگنی داده ها از دو روش گرافیکی (منحنی جرم مضاعف) و روش غیر گرافیکی (ران تست یا آزمون توالی) استفاده شد. معیار دوره های کم آبی و پربابی در یک آبخیز، مبتنی بر اندازه گیری اندازه جریان آب های سطحی در ایستگاه آب سنجی دایر در سطح آبخیز (که به شکل روزانه به عنوان اندازه آب دهی ثبت می شود) است (قمیشیون و حسینی ۲۰۰۸). اساسی ترین عامل برای به دست آوردن سنجهای نامبرده، تعیین سطح آستانه بود. به بیان دیگر، با انتخاب یک سطح آستانه، تحلیل خشک سالی نیز آسان تر خواهد شد. سطح آستانه می تواند میانگین آب دهی رود باشد. در این پژوهش، سطح آستانه خشک سالی آب شناختی آبخیز مطالعه شده با استفاده از رابطه ۱ (دراکوپ) تعیین شد.

$$[x_0 = xm - e \times s = xm[1 - (e \times cv)]] \quad (1)$$

X_0 : سطح آستانه، xm : میانگین داده ها، s : انحراف استاندارد، cv : ضریب تغییرات سری زمانی متغیر خشک سالی از قبیل آب دهی، e = عامل مؤثر مقیاس است. در این رابطه اگر e صفر باشد، $x_0 = xm$ یعنی آستانه خشک سالی آب شناختی و میانگین جریان رود برابر هستند (پانو و شارما ۲۰۰۲).

عبور آب از زمین های گوناگون سبب تغییرات فیزیکی و شیمیایی آن می شود و این تغییرات به خصوصیات زمین شناسی نقاطی که آب از آن عبور کرده است، بستگی دارد. شاخص ترین عامل های زمین شناسی مؤثر بر کیفیت آب، گنبد های نمکی و سازندهای مارنی است. موقعیت جغرافیایی محل و وضع آب و هوایی نیز تأثیر زیادی

آب (EC و TDS) و مقایسه آن با شاخص خشک‌سالی هواشناسی انجام شد. به‌منظور انجام آزمون معنی‌داری تغییرات در کیفیت آب (در سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪)، تهیه روند تغییرات، هم‌بستگی میان داده‌ها و تحلیل واریانس از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. همچنین، کیفیت آمارهای موجود با استفاده از روش‌های گوناگون از جمله مقایسه نظری آمار همزمان ایستگاه‌های مختلف و مهار اندازه‌های خیلی‌زیاد و یا خیلی‌کم، کیفیت تمام آمارها تأیید شد.

نتایج

جریان آب رود کشکان و رود خرم‌آباد پس از یکی‌شدن، با طی فاصله حدود ۴۰ کیلومتر به ایستگاه آب‌سنجی افرینه می‌رسد و سرانجام کیفیت آب سطحی آبخیز کشکان در محل خروجی آبخیز به‌وسیله ایستگاه آب‌سنجی پل دختر بررسی می‌شود.

ایستگاه پل‌دختر در فاصله حدود ۴۴ کیلومتری ایستگاه افرینه است. در فاصله میان ایستگاه افرینه و پل‌دختر دو شاخه فرعی دیگر به نام‌های رود چله‌هول و مادیان رود به رود اصلی کشکان می‌پیوندند. رود چله‌هول که در فاصله ۱۰ کیلومتری پایین دست ایستگاه افرینه به مسیر اصلی رود اضافه می‌شود، سطحی برابر ۸۱۷ کیلومترمربع است. همچنین، بیشترین سطح از آبخیز نامبرده شامل ۳۵/۵٪/تشکیلات آهکی، ۳۸/۴۷٪/شیل و مارن، ۱۶/۱۸٪/کنگلومرا و ۱۰/۰۵٪/رسوبات آبرفتی جوان است. در این پژوهش، روابط میان تغییرات زمانی و مکانی بارندگی با آب‌دهی آبخیز شامل رابطه میان میانگین سالانه بارش و میانگین سالانه آب‌دهی بررسی شد. بررسی نتایج میانگین ماهانه آب‌دهی آبخیز کشکان پایین‌دست در ایستگاه آب‌سنجی پل‌دختر، نشان داد که فروردین و شهریور ماه به‌ترتیب با میانگین ۱۳۹ مترمکعب در ثانیه و ۱۴/۹ مترمکعب در ثانیه، بیشترین و کم‌ترین اندازه آب‌دهی را داشتند (شکل ۳).

آب‌های خیلی‌خوب همگی EC کمتر از ۲۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر دارند و در طبقه C_1S_1 هستند. آب‌های خوب در طبقه‌های C_1S_2 , C_2S_1 , C_2S_2 ، آب‌های با کیفیت متوسط در طبقه‌های C_3S_1 , C_3S_2 , C_2S_3 و C_3S_3 و بقیه آب‌های نامناسب در طبقه‌های C_4S_1 , C_4S_2 , C_4S_3 , C_1S_4 , C_2S_4 , C_3S_4 , C_4S_4 هستند.

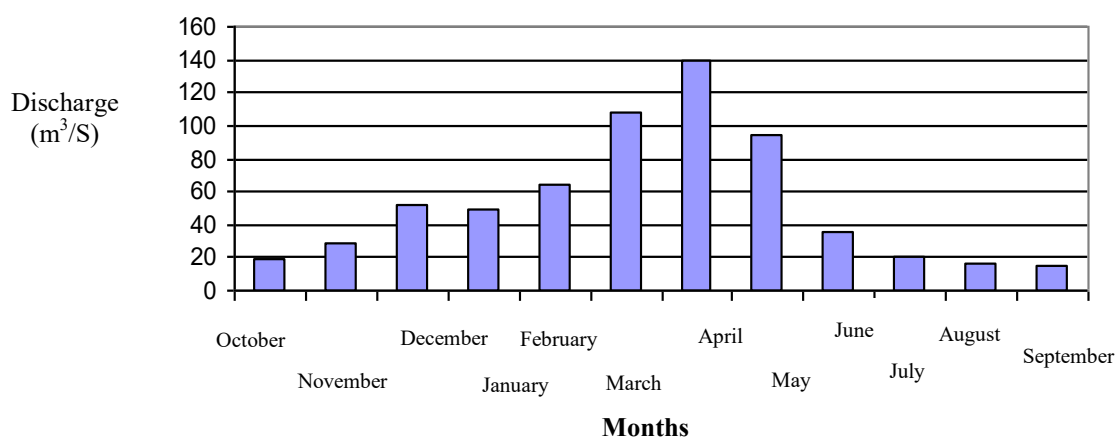
باید توجه داشت که هر اندازه اندیس‌ها بزرگتر باشد کیفیت آب‌ها نامناسب‌تر است و فقط در شرایط خاصی مثلاً در خاک با بافت درشت، زهکشی زیاد و گیاهان مقاوم به شوری می‌توان از بعضی از این آب‌ها استفاده کرد. (مهدوی ۲۰۰۵). نمودار دورو یک روش نظری معروف در آب‌زمین‌شناسی (هیدروژئولوژی) به‌شمار می‌آید که برای نمایش یون‌های اصلی به‌شکل درصد در میلی‌اکی والان در دو نمودار سه خطی (مثلثی) نشان‌داده می‌شود و یکی برای کاتیون‌ها و یکی برای آنیون‌ها است و دیگری اندرکنش آنها درج می‌شود.

نمودار دورو یک نمودار تخصصی برای نمونه‌های شیمیایی آب است که در آن ارزش‌های عددی کاتیون‌ها و آنیون‌ها در دو طرح واره مثلثی جدا می‌شوند و به‌شکل نقاطی در پایین هر مثلث رسم می‌شوند. افزون بر این، با استفاده از نمودار دورو امکان مقایسه مستقیم دو سنجه pH و TDS آب زیرزمینی وجود دارد.

در این پژوهش، تحلیل ویژگی‌های خشک‌سالی اقلیمی، تعیین کیفیت آب رودها از نظر آلودگی شیمیایی و مقایسه آنها با معیارهای جهانی WHO و EPA، انجام شد. شاخص‌های کیفیت آب کشاورزی (ویلکوکس)، سختی آب، آب شرب (شولر) نیز بررسی شد. مقایسه تغییرات کیفیت، انواع و رخساره آب‌ها با تغییرات بارش و حجم آب‌دهی ماهانه، فصلی و سالانه رودها انجام شد. برای بررسی روند یا نبودن روند در داده‌ها، از سه روش مهم استفاده شد که عبارت بودند از: الف: آزمون نقاط عطف^۱، ب: آزمون کندال^۲، ج: آزمون وایازی خطی. در این پژوهش، بررسی روند تغییرات شاخص‌های کیفیت

1 - Turning Point test

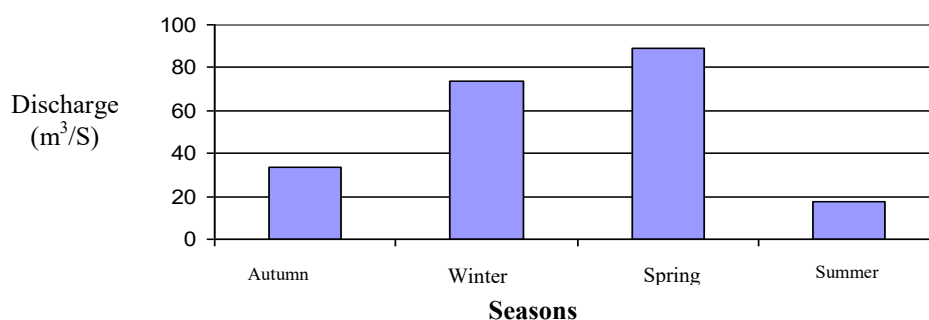
2 - Kendal test



شکل ۳- نمودار توزیع آب‌دهی ماهانه رود کشکان پایین‌دست در ایستگاه پلدختر.

Figure 3- Monthly discharge change in Lower Kashkan, Poldokhtar Station.

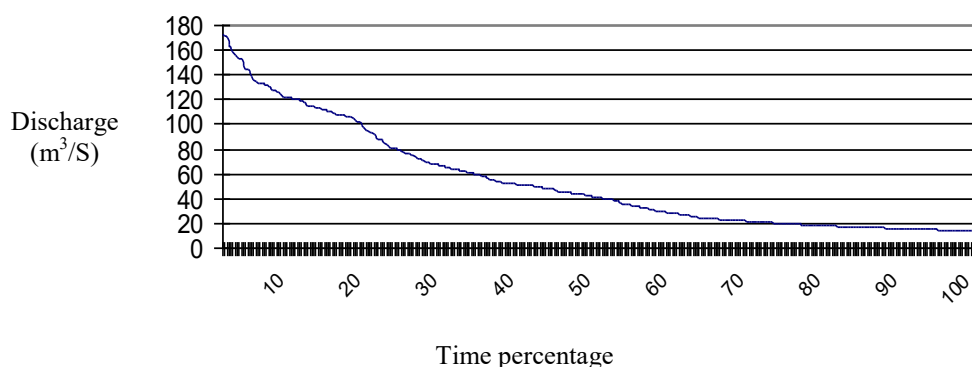
با توجه به شکل ۴، فصل بهار و تابستان به ترتیب با بیشترین و کم‌ترین اندازه آب‌دهی را داشتند. میانگین ۸۹/۳ مترمکعب در ثانیه و ۱۷/۳ مترمکعب در ثانیه



شکل ۴- نمودار تغییرات فصلی آب‌دهی در رود کشکان پایین‌دست در ایستگاه پلدختر.

Figure 4- Seasonal change of discharge in Lower Kashkan, Poldokhtar Station.

نمودار منحنی تداوم جریان رود کشکان پایین‌دست در ایستگاه آب‌سنجی پلدختر در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- نمودار منحنی تداوم جریان رود کشکان پایین‌دست در ایستگاه پلدختر.

Figure 5- Flow duration curve in Lower Kashkan, Poldokhtar Station.

کمی گسترش داشت. در دی ماه شدت خشک‌سالی‌ها افزایشی و متمایل به شدید بود که در سال آبی ۶۲-۶۳ مشاهده شد. ابتدای دوره پژوهش در بهمن ماه در دو سال آبی چهارم و پنجم شدت خشک‌سالی متوسط و متمایل به شدید بود.

در اسفند ماه، تعداد سال‌های خشک‌سالی و ترسالی تقریباً برابر بود و محدوده شاخص‌های مثبت-منفی نیز برابر بود. شاخص منفی تا بیش از ۲- گسترش یافت و در سال آبی پنجم خشک‌سالی شدید مشاهده شد، ولی فراوانی سال‌های خشک و ترسالی مشابه بود. در اردیبهشت ماه، خشک‌سالی شدید در سال پنجم دوره مطالعه شده مشاهده شد. همچنین، تعداد فراوانی سال‌های ترسالی و خشک‌سالی مشابه بود.

نتایج آزمون نقاط عطف برای گام سالانه سنجه‌های شیمیایی کیفیت آب آبخیز کشکان در جدول ۲ نشان داده شده است. هم‌چنین تغییرات شاخص SPI در سری زمانی ۳ تا ۲۴ ماهه در قالب نقشه‌های پهنه‌بندی و نمودارهای گوناگون تهیه شد. براساس روش نامبرده، سطح آستانه خشک‌سالی آبخیز رود کشکان پایینی در پل‌دختر محاسبه شد. نتایج آزمون نقاط عطف برای سری زمانی سنجه‌های شیمیایی کیفیت آب در ایستگاه پل‌دختر در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج این پژوهش با نتایج حاصل از تحقیقات کاظمی ۲۰۲۱، کاظمی و همکاران ۲۰۲۲ هم‌خوانی دارد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده به‌طور جامع داده‌های کیفیت آب در تمام ایستگاه‌های آبخیز به‌شکل یک جا با هم مقایسه شوند و منابع آلاینده ناشی از فاضلاب روستایی نیز تفکیک شود.

از آنجایی که صحت و سقم آمارها منوط به آزمون همگنی است بنابراین، آزمون همگنی بر روی داده‌های موجود انجام پذیرفت. افزون بر آزمایش‌ها و تعیین متغیرهای فیزیکی و شیمیایی نامبرده، اندازه‌های آب‌دهی رود نیز در زمان برداشت نمونه آب ثبت شد.

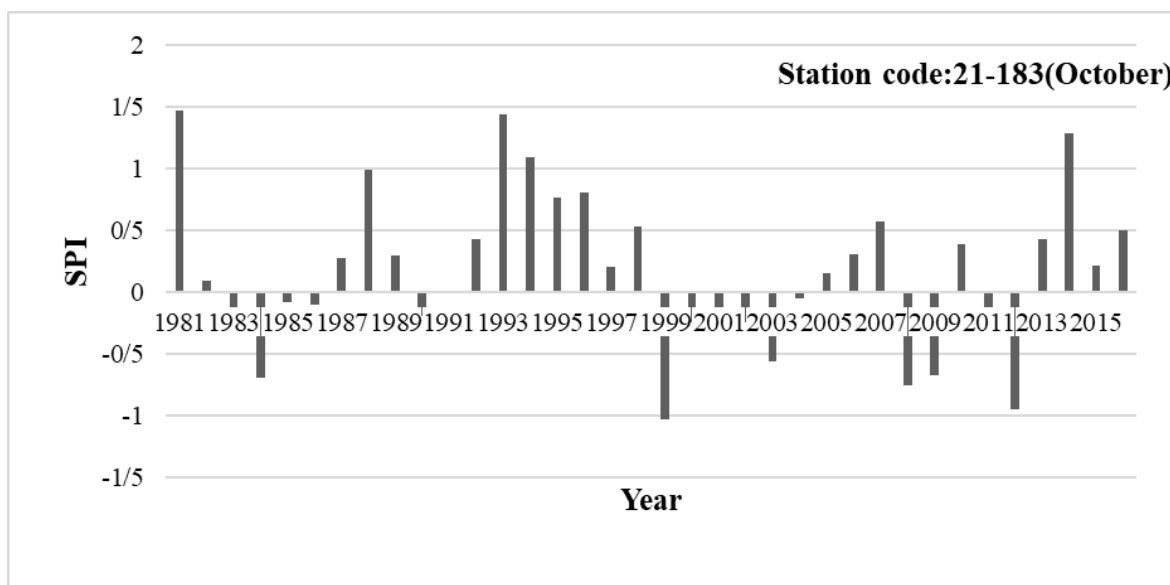
برای صحت‌سنجی نتایج تحلیل شیمیایی نمونه‌ها از روش‌های تعادل‌سازی یونی و نسبت هدایت الکتریکی به جمع کاتیون‌ها (بر حسب میلی‌اکی‌والان در لیتر) که باید میان ۹۰ تا ۱۱۰ باشد، استفاده شد (نصیری ۱۹۹۳). سپس، وجود رابطه معنی‌دار میان متغیرها در هر کدام از حالت‌های لگاریتمی، خطی، نمایی و توانی بررسی شد و رابطه‌ای که اندازه ضریب هم‌بستگی بیشتری داشت انتخاب شد. همچنین، در این بررسی در زمان نمونه‌گیری، اندازه آب‌دهی ثبت شد. به‌طوری که پس از تعیین آستانه خشک‌سالی آب‌شناختی فصلی و سالانه در هر یک از زیرآبخیزها، مشخص شد آب‌دهی رود در لحظه نمونه‌گیری در شرایط کم‌آبی یا پرآبی بوده است. همچنین، پس از تعیین آستانه آب‌شناختی فصلی در زیرآبخیزهای کشکان و جدا کردن آمار نمونه‌گیری در حالت‌های کم‌آبی و پرآبی از یکدیگر، مشخص شد در بعضی از زیرآبخیزها در شرایط کم‌آبی در آن فصل و در آن آبخیز هیچ نمونه‌گیری انجام نشده است یا بیشترین نمونه‌گیری یک یا دو مرتبه بوده است. از این‌رو، آمار بسیار کم بررسی نشد. نتایج بررسی وضعیت تغییرات شاخص خشک‌سالی در پل‌دختر در آبان ماه نشان داد که ۱۰ سال وضعیت ترسالی ضعیف تا متوسط و ۱۰ سال خشک‌سالی ضعیف تا متوسط در منطقه مطالعه شده وجود داشته است.

شاخص خشک‌سالی در آذر ماه در بخش مثبت شاخص،

جدول ۲- نتایج آزمون نقاط عطف برای گام سالانه سنجه‌های شیمیایی کیفیت آب آبخیز کشکان.

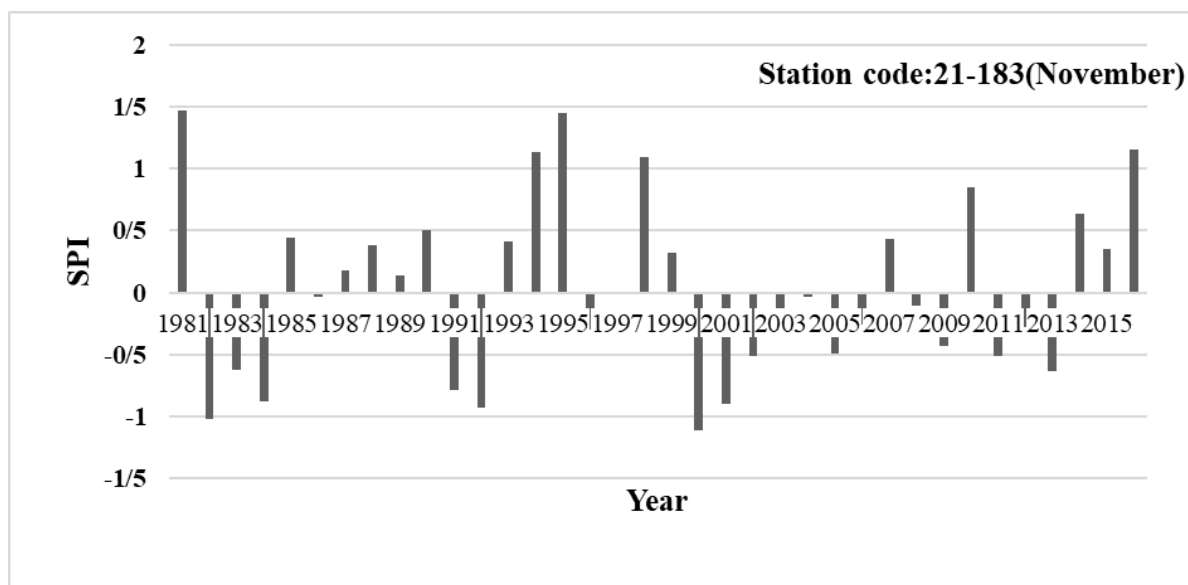
Table 2- Results of turning point test for annual water chemical quality indices in Kashkan Basin.

Basin	Hydrometric station	Cl ⁻				SO ₄ ²⁻				pH				TDS			
		P	E (P)	Var (P)	Z	P	E (P)	Var (P)	Z	P	E (P)	Var (P)	Z	P	E (P)	Var (P)	Z
Lower Kashkan	Poldokhtar	15	18.7	5	-1.68	15	18.7	5	-1.68	15	18.7	5	-1.68	18	18.7	5	-0.14
		EC				SAR				SSP				TH			
		20	18.7	5	0.6	15	18.7	5	-1.68	15	18.7	5	-1.68	16	18.7	5	-1.2



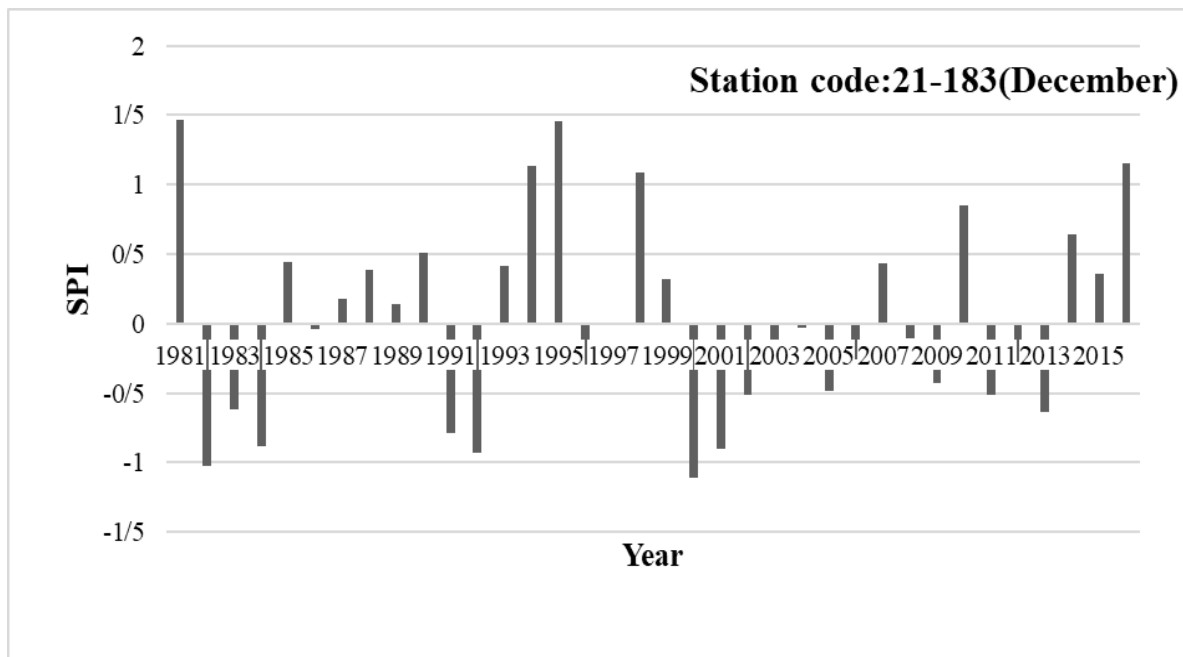
شکل ۶- تغییرات ماهانه شاخص بارش استاندارد ۶ ماهه در دوره مطالعه شده (ماه اکتبر).

Figure 6- Monthly SPI changes through the studied period (October).



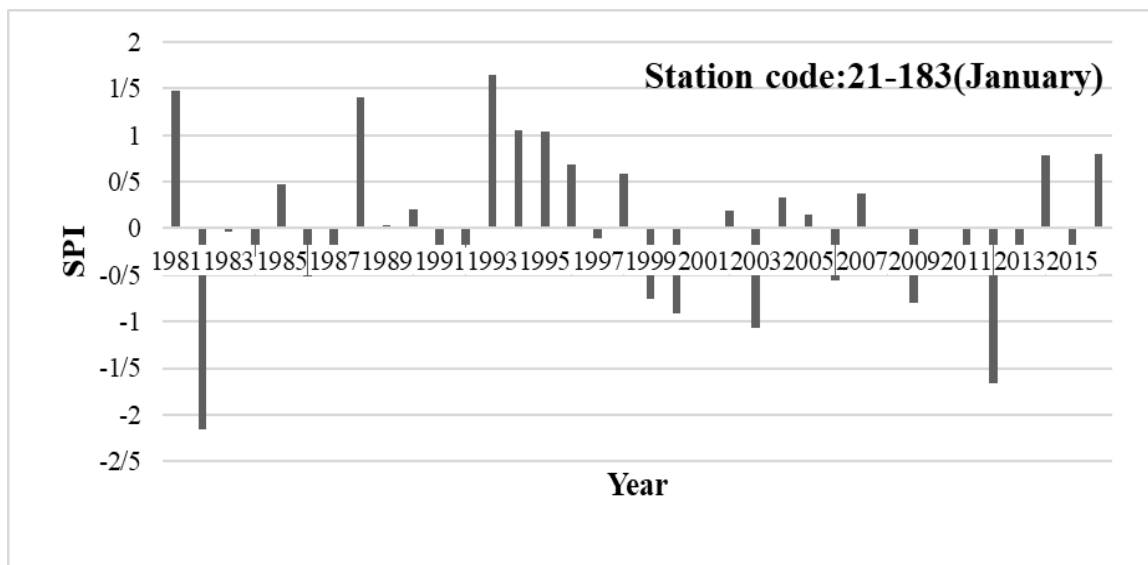
شکل ۷- تغییرات ماهانه شاخص بارش استاندارد ۶ ماهه در دوره مطالعه شده (ماه نوامبر).

Figure 7- Monthly SPI changes through the studied period (November).



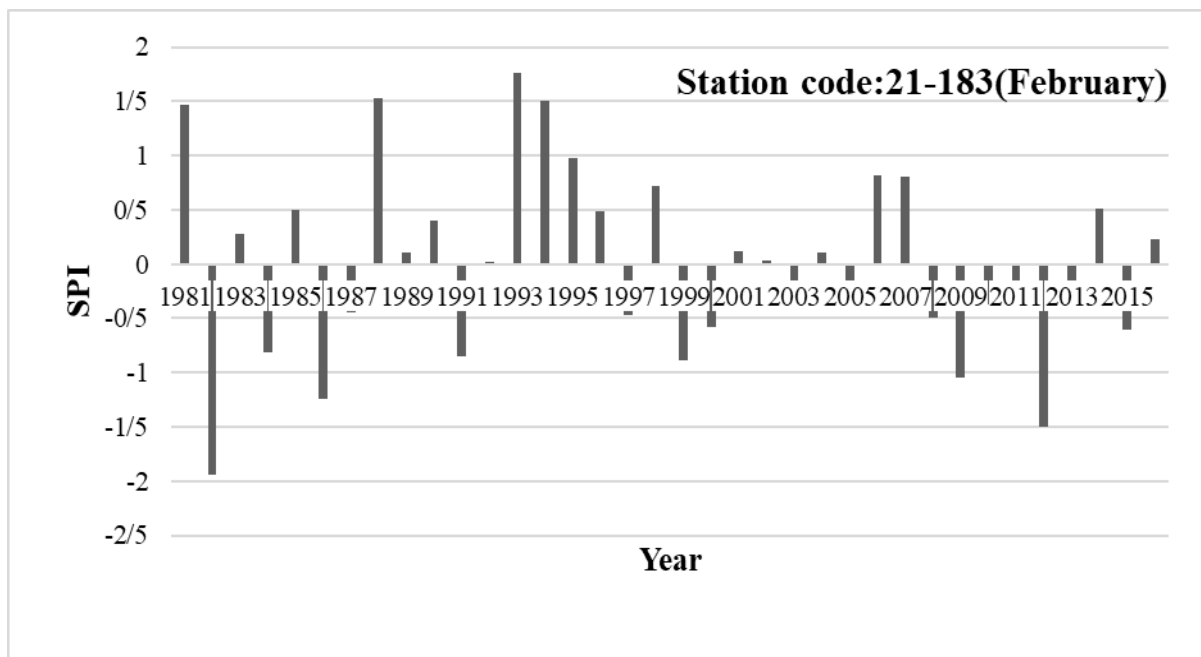
شکل ۸- تغییرات ماهانه شاخص بارش استاندارد ۶ ماهه در دوره مطالعه‌شده (ماه دسامبر).

Figure 8- Monthly SPI changes through the studied period (December).



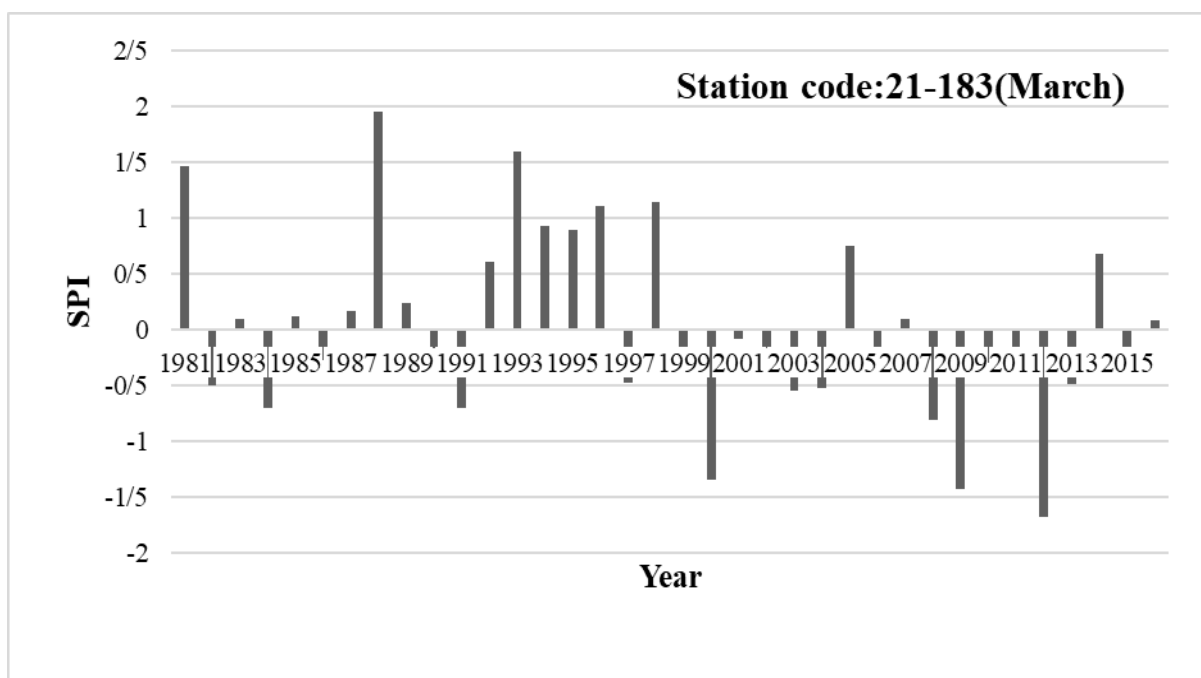
شکل ۹- تغییرات ماهانه شاخص بارش استاندارد ۶ ماهه در دوره مطالعه‌شده (ماه ژانویه).

Figure 9- Monthly SPI changes through the studied period (January).



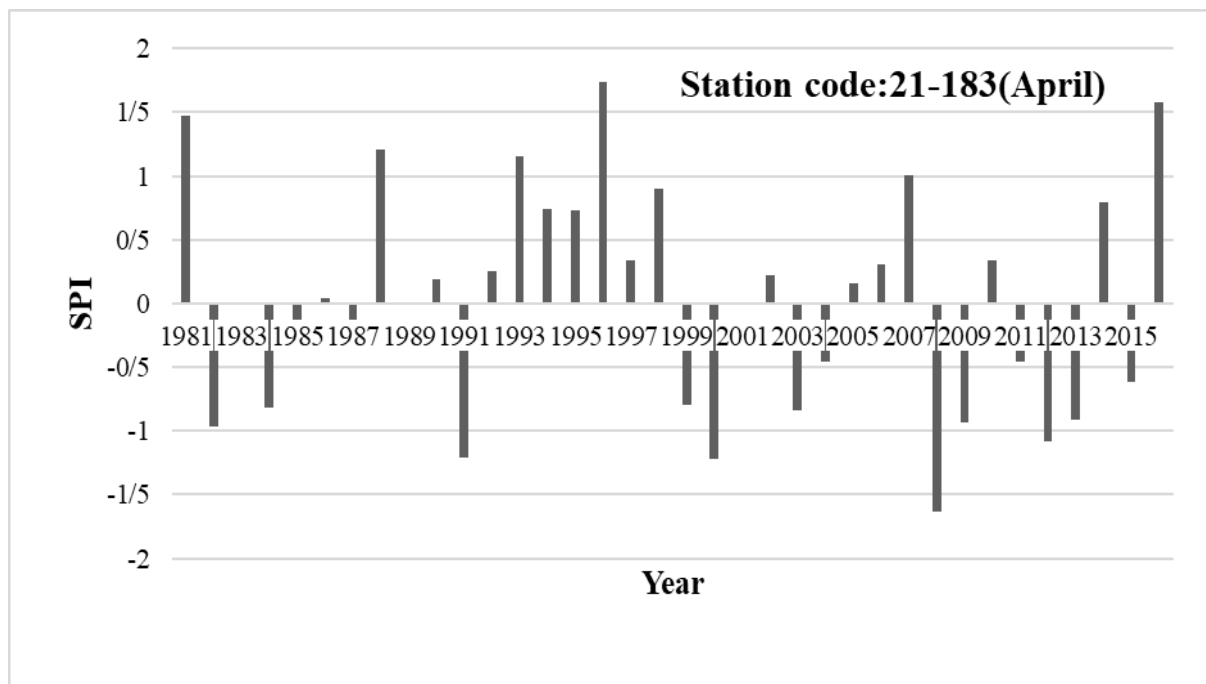
شکل ۱۰- تغییرات ماهانه شاخص بارش استاندارد ۶ ماهه در دوره مطالعه شده (ماه فوریه).

Figure 10- monthly SPI changes through the studied period (February).



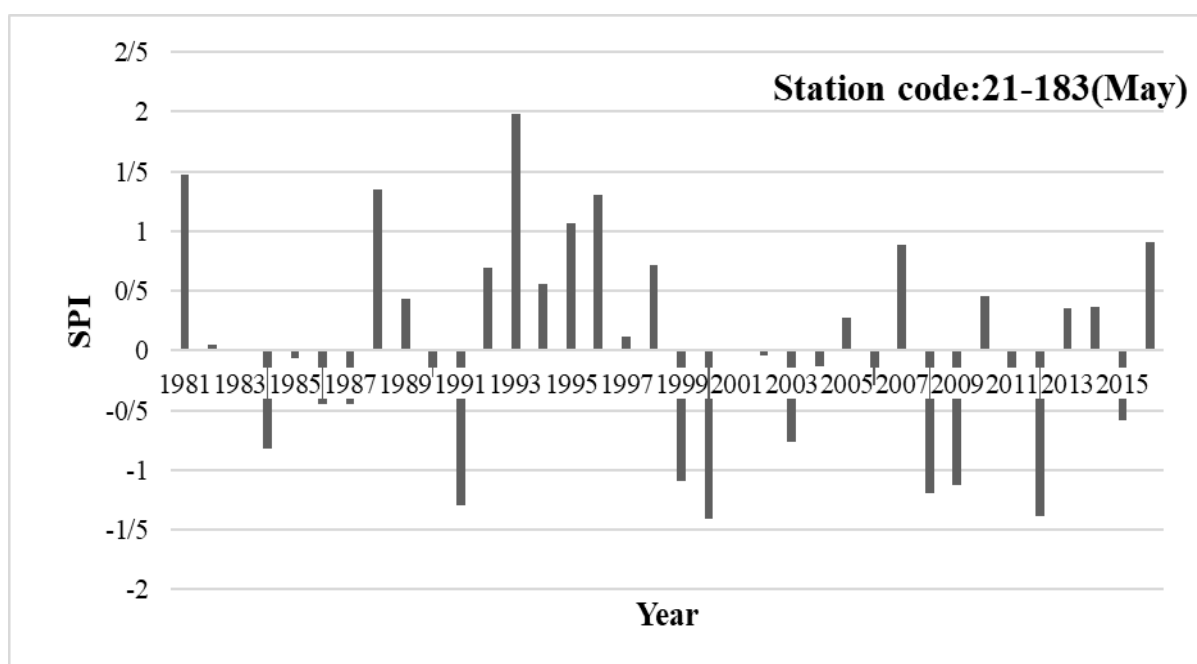
شکل ۱۱- تغییرات ماهانه شاخص بارش استاندارد ۶ ماهه در دوره مطالعه شده (ماه مارس).

Figure 11- Monthly SPI changes through the studied period (March).



شکل ۱۲- تغییرات ماهانه شاخص بارش استاندارد ۶ ماهه در دوره مطالعه‌شده (ماه آوریل).

Figure 12- Monthly SPI changes through the studied period (April).



شکل ۱۳- تغییرات ماهانه شاخص بارش استاندارد ۶ ماهه در دوره مطالعه‌شده (ماه می).

Figure 13- Monthly SPI changes through the studied period (May).

برای آبخیز رود کشکان پایینی در ایستگاه آب‌سنجی پلدختر که با روش دراکوپ (رابطه ۱) در جدول ۳ آورده شده است.

با رابطه ۱ اندازه‌های سطح آستانه خشک‌سالی آب‌شناختی زیرآبخیزهای کشکان به شکل فصلی و سالانه محاسبه شد و نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است. نتایج تعیین سطح آستانه خشک‌سالی آب‌شناختی به شکل فصلی و سالانه

جدول ۳- اندازه‌های سطح آستانه خشک‌سالی در سطح آبخیز کشکان.

Table 3- Drought threshold in Kashkan Basin.

drought threshold $X_0(m^3/s)$					Hydrometric station
Annual	Summer	Spring	Winter	Fall	
26.8	8.3	44.2	36.8	16.2	Poldokhtar

بنابراین، با استفاده از روش‌های هم‌بستگی و وایزی دو متغیره، رابطه و اثرات میان متغیرهای مستقل کم‌آبی و پربابی با متغیرهای وابسته سنج‌های کیفیت شیمیایی و آب‌های سطحی آبخیز با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS و Excel در ماه‌ها و فصل‌های گوناگون بررسی شد. که نتایج مربوط به فصل پاییز در جدول ۴ نشان داده شده است.

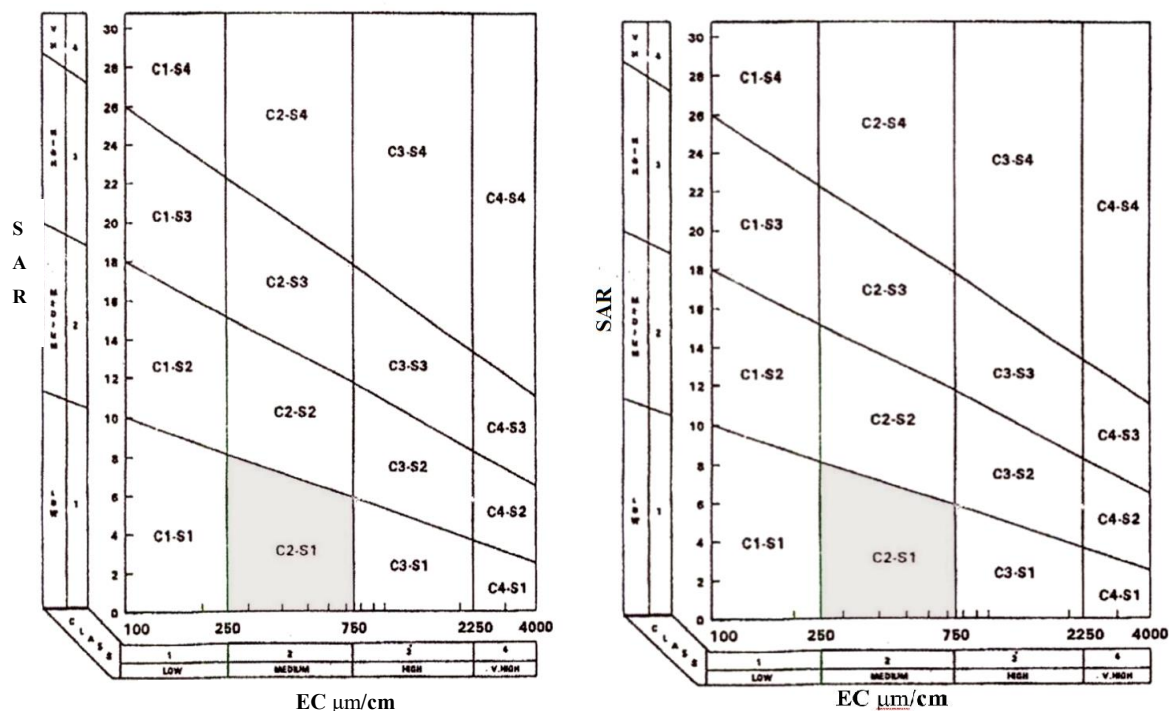
جدول ۴- نتایج بررسی اثرات دوره‌های کم‌آبی و پربابی بر کیفیت آب آبخیز کشکان پایین‌دست در فصل پاییز.

Table 4- results of wet and dry spell impacts on water quality in lower Kashkan during Autumn.

Chemical parameter	durations	correlation	Significance level			Equations	Coefficient of determination
			0.01	0.05	0.10		
Ca^{2+}	Dry spell	-0.59		Sig.	Sig.	$y=-0.1\ln(x)+3.7$	0.35
	Wet spell	0.52	Sig.	Sig.	Sig.	$y=0/006 x+2.7$	0.27
Mg^{2+}	Dry spell	-0.6		Sig.	Sig.	$y=4.2e-0.05x$	0.36
	Wet spell	-0.5	Sig.	Sig.	Sig.	$y=5.2x-0.28$	0.26
Na^+	Dry spell	0.63		Sig.	Sig.	$y=0.11x+0.08$	0.4
	Wet spell	-0.38	Sig.	Sig.	Sig.	$y=-0.32\ln(x)+2.3$	0.15
Hco_3^-	Dry spell	-0.54			Sig.	$y=5.15e-0.04x$	0.3
	Wet spell	-0.32		Sig.	Sig.	$y=3.5e-0.009x$	0.1
cl^-	Dry spell	-0.24					
	Wet spell	-0.88	Sig.	Sig.	Sig.	$y=7.8x-0.5$	0.78
So_4^{2-}	Dry spell	0.42					
	Wet spell	0.63	Sig.	Sig.	Sig.	$y=0.007x+0.9$	0.4
PH	Dry spell	0.54			Sig.	$y=7.04e0.008x$	0.29
	Wet spell	-0.26			Sig.	$y=-0.15\ln(x)+8.3$	0.07
T.D.S	Dry spell	-0.47					
	Wet spell	0.2					
EC	Dry spell	-0.52			Sig.	$y=757.3e-0.02x$	0.27
	Wet spell	-0.2					
SAR	Dry spell	0.7	Sig.	Sig.	Sig.	$y=0.1x-0.16$	0.5
	Wet spell	-0.35		Sig.	Sig.	$y=-0.2\ln(x)+1.5$	0.12
SSP	Dry spell	0.73	Sig.	Sig.	Sig.	$y=2.18x-0.9$	0.54
	Wet spell	-0.28			Sig.	$y=-3.6\ln(x)+33.5$	0.08
TH	Dry spell	-0.73	Sig.	Sig.	Sig.	$y=418.5e-0.05x$	0.54
	Wet spell	0.17					

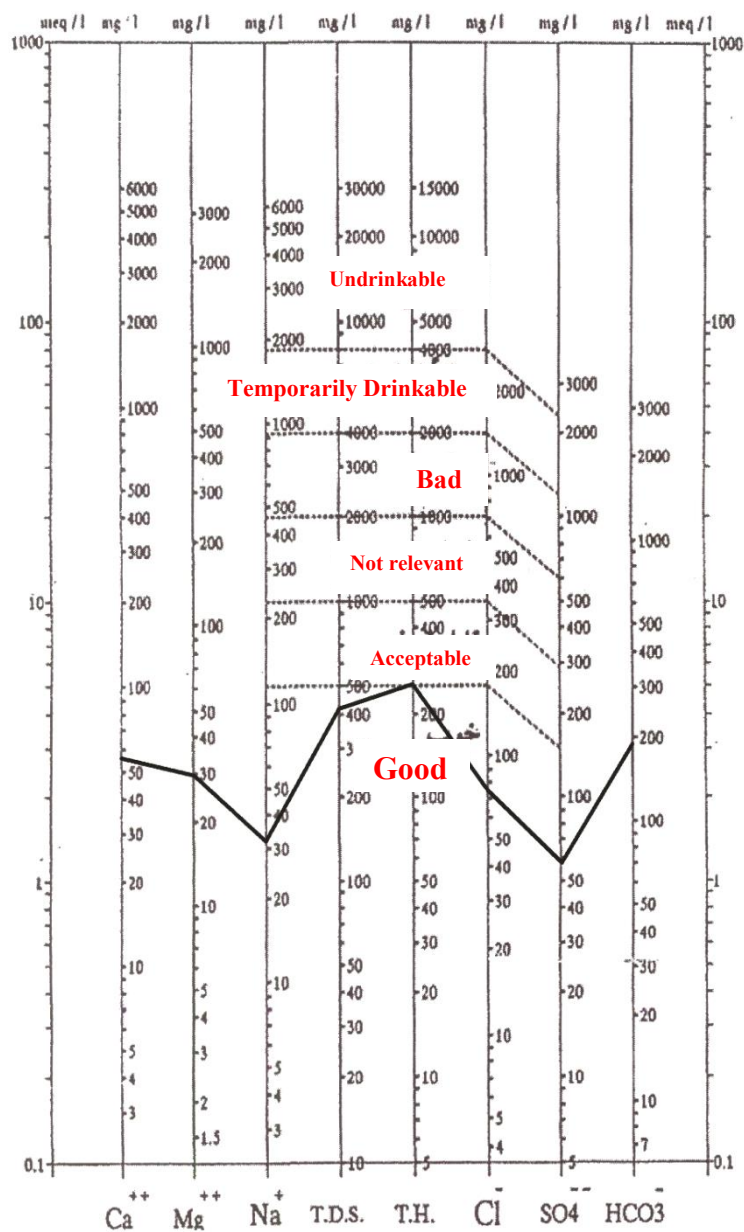
را می‌توان نام برد. البته غلظت زیاد بی‌کربنات و سولفات و کلسیم نیز می‌تواند نتیجه دگرسانی سنگ‌های منطقه و شستشوی مجدد املاح درون آبرفت بستر آبراهه‌ها باشد. در مجموع متغیرهای شیمیایی آب سطحی در حد مناسب بود و فقط سختی آب کمی زیاد بود. از آنجایی که بررسی و تجزیه و تحلیل کیفیت شیمیایی آب‌ها پیچیدگی‌هایی برخوردار است بنابراین، به‌منظور سهولت دستیابی به اطلاعات لازم از روش‌های نمایشی وضعیت کیفی آب استفاده می‌شود. در این رابطه روش‌های گوناگونی به‌کار گرفته شده است که ساده‌ترین آن ارائه آمار در جدول‌های تحلیل کیفیت شیمیایی آب است. برای تعیین کیفیت آب آبیاری، نمودار ویلکاکس رسم شد (شکل ۱۴). هم‌چنین به‌منظور بررسی کیفیت آب برای نوشیدن، از نمودار شور استفاده شد (شکل ۱۵).

به‌منظور بررسی تغییرات زمانی اندازه‌های هدایت الکتریکی در ایستگاه‌های گوناگون، ابتدا میانگین سالانه برای هر ایستگاه محاسبه شد و با رسم نمودار، تغییرات EC در هر ایستگاه بررسی شد. اندازه‌های EC در طول زمان نسبتاً افزایش یافت، اما در سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ این افزایش قابل توجه و برابر ۴۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر بود که سرانجام به ۱۰۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر رسید. به‌طور کلی اندازه‌های EC در سال ۱۳۸۴ و در سال ۱۳۸۵ در مقایسه با دیگر زمان‌ها، افزایش قابل توجهی داشت. یکی از دلایل مهم این افزایش را می‌توان کاهش بارندگی و رواناب به مدت ۷ سال متوالی (۸۴-۱۳۷۸) دانست. از این‌رو، کمترین اندازه رواناب ثبت‌شده در ایستگاه پلدختر در سال‌های نامبرده بود. برخی از متغیرهای شیمی آب و یونها ناشی از سنگ‌شناسی دولومیتی موجود در منطقه و آبخیز است. در این راستا، یون‌های پتاسیم، منیزیم و کلرید



شکل ۱۴- نمودار ویلکاکس (طبقه‌بندی آب آبیاری) کشکان پایینی در ایستگاه پلدختر.

Figure 14- Wilcox diagram of Lower Kashkan in Poldokhtar.



شکل ۱۵- نمودار شولر (طبقه‌بندی آب آشامیدنی) کشکان پایینی در ایستگاه پلدختر.

Figure 15- Schoeller's diagram of Lower Kashkan in Poldokhtar.

فهرست منابع

- Agrawala, S, Barlow M, Cullen H, Lyon B. 2001. The drought and humanitarian crisis in central and southwest Asia: A climate perspective, 1(1): 11-24, New York.
- Ahrari Roudi, M. 2018. Assessment the effects of drought on groundwater quantity and quality of Sistan and Baluchistan Province. New Findings in Applied Geology, 12(23): 104-113. <https://doi.org/10.22084/nfag.2018.13178.1249>. (In Persian).
- Alizadeh A. 2006. Principals of hydrology, Ferdowsi University press, Mashhad, 228 p. Iran. (In Persian).
- Amini A, Abdeh Kolahchi, A, Al-Ansari N, Karami Moghadam M, Mohammad T. 2019. Application of TRMM precipitation data to evaluate drought and its effects on water resources instability. Applied Sciences, 9(24): 5363-5377. <https://doi.org/10.3390/app9245377>
- Amiriyani A, Tabari H, Kashkoli HA, Hasonizadeh H, and Soltani H. 2009. Evaluation of drought effects on Maroon River water quality. 8th International Seminar on River Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. (In Persian).
- Bahrani M, Moazed H, Zareie H. 2009. A study on Gachsaran formation impacts on Zhre River water quality, 8th international Conference on River Engineering, Chamran University, Ahvaz, Iran. (In Persian).
- Eghtedari M, Bazrafshan J, Shafie M, Hejabi S. 2016. Prediction of streamflow drought using SPI and Markov Chain in Kharkheh's Basin. Journal of Water and Soil Conservation, 23(2): 115-130. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.15189.3037>
- Goodarzi M, Hoseini A. 2018. Drought, assessing vulnerability, Salam Sepahan and Miras Kohan, Isfahan (In Persian).
- Goodarzi M, Kazemi R, Mostafaei A. 2021. Investigating the effect of dry spells on water quality in Kashkan, 1st International Conference on Bio-math, Semnan, Iran, (In Persian).
- Goodarzi M, Kazemi R. 2022. The effects of drought on surface water quality in Kakareza, 11th National Conference on Water Harvesting, Bojnord. (In Persian).
- Kazemi R. 2021. Research trends and hotspots on Karst water resource in Iran and the world. Water Harvesting Research, 4(2): 245-255. <https://doi.org/10.22077/jwhr.2022.5373.1064>
- Kazemi R, Porhemmat J, Ghermez Cheshme B. 2022. Investigating the impact of drought on the base flow using standardized base flow index, case study: Kaka-Reza Catchment. Watershed Engineering and Management, 14(2): 156-167. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2021.352955.1870>
- Koushki R, Rahimi M, Amiri M, Mohammadi M, Dastourani J. 2017. Investigation of relationship between meteorological and hydrological drought in Karkha Basin. Iranian Journal of Ecohydrology, 4(3): 687-698. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ije.2017.62496>
- LashaniZand M. 2001. Erosion in Kashkan in relation with precipitation intensities, M.Sc. Thesis, Isfahan University, MA thesis, faculty of human sciences. (In Persian).
- Mahdavi. 2005. Applied hydrology, Tehran university press. (In Persian).
- Malekinezhad H, Soleimani Motlagh M. 2011. Assessing the severity of climatic and hydrologic droughts in Chaghalvandi Basin, Iran Water Research, 9(3): 61- 72. (In Persian).
- 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.
- Parsamehr A, Khosravani Z. 2017. Determining drought severity using multi-criteria decision-making based on Topsis method (Case study: Selective stations of Isfahan Province). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 24(1): 16-29. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2017.109846>
- Schoeller, H. 1965. Qualitative evaluation of groundwater resources. *Methods and techniques of groundwater investigations and development*. UNESCO, 5483.
- Stöckline J. 1968. Structural History and Tectonics of Iran: A Review. *AAPG Bulletin*, 52, 1129-1258. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)00185-C](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(94)00185-C)
- Van Vleit MTH, Zwolsman JJG. 2008. Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse River. *Journal of Hydrology*, 353(3): 1-17.
- Verdi Pourazad A, Azarakhshi M, Mosaedi A, Farzadmehr J. 2014. Investigation of the effect of meteorological drought on groundwater changes in Mashhad plain using GRI and SPI indicators. *International Conference on Sustainable Development, Strategies and Challenges with a focus on agriculture, Natural Resources, Environment and Tourism, Tabriz*. (In Persian).
- Wilcox LV. 1958. Determining the quality of irrigation water (No. 197). *US Department of Agriculture*.
- Wilhite DA, Glantz MH. 1985. Understanding: The drought phenomenon: the role of definitions. *Water International*, 10(3): 111-120.



Fars Agricultural and Natural Resources
Research and Education Center



Agricultural Research, Education
and Extension Organization

Assessment of Surface Water Resources of Poldokhtar Due to Drought Impacts

Massoud Goodarzi^{*1} , Rahim Kazemi² 

1- Associate professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), AREEO, Tehran, Iran

2- Assistant professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), AREEO, Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Understanding water in terms of quality, quantity and its supply is an essential step towards optimizing consumption. In recent years, Iran has suffered from prolonged droughts, causing significant damage to various parts of the country each year. Severe droughts in arid and semi-arid regions caused by inappropriate human interventions have reduced the quantity and quality of surface water resources in these regions. Overall, the amount of precipitation, the duration and intensity of droughts, climatic conditions, and industrial and agricultural activities are among the factors that significantly affect the quality of surface waters. To this end, researchers have used various indices to monitor drought and its impact on water quality. Therefore, it is essential to use appropriate methods to study the effects of phenomena such as drought on the quality of surface waters. This is a tool for water resources in critical conditions. The main objective of this research was to identify wet and dry periods and the droughts that occurred using the SPI index. Then, the sensitivity of surface water chemical quality indicators in the Keshkan watershed during drought periods and their changes over a 35-year period were examined. Additionally, in this context, the frequency and intensity of hydrological drought events, as well as the magnitude and range of flow changes affected by droughts in the studied watershed, were determined.

Article Type: Research Article

*Corresponding Author E-mail: massoudgoodarzi@yahoo.com

Citation: Goodarzi, M., Kazemi, R. 2024. Assessment of Surface Water Resources of Poldokhtar Due to Drought Impacts. *Watershed Management Research*. 37(4):135-155.

DOI: 10.22092/WMRJ.2024.364593.1567

Received: 20 January 2024, **Received in revised form:** 10 February 2024, **Accepted:** 18 March 2024

Published online: 01 January 2025

Watershed Management Research, VOL. 37, No.4, Ser. No:145, Winter 2025, pp. 135-155.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center

©Author(s)



Materials and Methods

The studied area is part of the Keshkan watershed, covering an area of 9,560 km², which accounts for approximately 22% of the larger Karkheh watershed. It is located 950 km southwest of Tehran in the central Zagros region. In this research, the chemical indicators of surface waters were measured. Then, the periods of meteorological drought occurrences, as well as the relationships between these events and the quality of surface waters in Lorestan Province, were determined. To this end, the chemical quality of rivers over a 35-year period was analyzed using existing quality data from hydrometric stations, including anions (Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻) and cations (Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺), as well as other variables such as SAR, pH, TH, TDS, and EC during the common statistical period (1981-2016). Although there are many challenges in obtaining water quality data today, fortunately, in this long-term study, the number of samples, data homogeneity, and the common period were adequate. Considering that the studied period included normal, dry, and wet periods, the quality of the research was also appropriate. Additionally, it should be noted that the Water Resources Development Company, for various reasons related to validation, always publishes data several years later. Therefore, it was not possible to examine a longer statistical period. On the other hand, the most extensive droughts in the region occurred during this time frame.

Results and Discussion

Although dolomitic, calcareous, and marly formations play a role in reducing the quality of surface runoff passing through them, based on the results of this research, the occurrence of extensive and numerous droughts has also led to an increase in the concentration of salts per unit volume, specifically, the pH of the water increased from 7.61 to 7.68, and the EC of the water rose from 300 µm/cm in 1981 to 570 µm/cm in 2016, yet it still remained in an acceptable quality class for irrigation. Using correlation and bivariate regression methods, the relationships and effects between the independent variables of drought and flooding with the dependent variables related to the chemical quality indicators of surface waters in the watershed were examined using SPSS and Excel software. The results of the analysis of anions and cations indicated that their levels during drought and flooding periods were significant at the 1 and 5% levels. The levels of the SAR, SSP, and TH indices were more significant under drought conditions. Additionally, the changes in EC levels during drought periods were significant at all levels.

Conclusion and suggestions

In general, droughts have a close relationship with water crises and the reduction of surface water resources. Therefore, examining the impact of drought on the quantity and quality of surface waters is important. Using the results of this research, a better understanding of the factors affecting the quality of surface waters can be achieved. The results of this research indicated that despite the decrease in quality, surface waters remain suitable for irrigation in the agricultural sector. It is recommended that the role of industrial uses and pollutants in surface waters be examined as well. Especially in the case of stations located downstream of residential and industrial areas, monitoring changes and the type of pollution is of great importance.

Keywords: Comprehensive watershed management, drought, Kashkan Basin, semi-arid, SPI, surface water quality

نام‌های داورانی که در این شماره با نشریه همکاری کردند:
(به ترتیب حروف الفبا)

آقابیکگی امین، سهیلا

پاک‌پرور، مجتبی

چوبین، بهرام

حسن‌پور، رضا

حسینعلی‌زاده، محسن

حق‌آبی، امیرحمزه

خلیلی، داور

داودی‌راد، علی‌اکبر

دسترنج، علی

دستورانی، محمد تقی

رستمی‌زاد، قباد

زارع، محمد

سلیمان‌پور، سید مسعود

صوفی، مجید

عرفانی‌فرد، سید یوسف

قرمزچشمه، باقر

کاویان، عطاالله

کله‌هویی، مهین

مصطفی‌زاده، رئوف

راهنمای نگارش مقاله برای نشریه‌ی پژوهش‌های آبخیزداری

توصیه می شود در وارد کردن ترتیب و جایگاه نویسنده (نویسندگان) دقت زیادی به کار برده شود. در هیچ حالتی به جز موانع قانونی، امکان جابه جایی (حذف یا اضافه شدن نویسنده، تغییر یا جابه جایی نویسنده ی مسئول، یا تغییر در خود مقاله) پس از ثبت اولیه در تارنمای نشریه نیست، و پس از پذیرفته شدن، مقاله با مشخصه هایی که در تارنما ثبت شده است جاب خواهد شد.

ساختار مقاله‌ها

۱- نام و نام خانوادگی، عنوان (جایگاه) سازمانی، نشانی، شماره‌ی تلفن و رایانامه‌ی نویسنده یا نویسندگان باید در صفحه‌ی جدا به‌همراه عنوان مقاله به فارسی و انگلیسی آورده شود. این صفحه باید در پرونده‌ی مستقل با نام «مشخصه‌های نویسندگان» در نرم‌افزار Word ذخیره و در صفحه‌خانه‌ی نشریه بارگذاری شود.

لطفاً توجه شود که این مشخصه‌ها در تارنمای نشریه نیز به‌درستی ثبت شود، زیرا مبنای چاپ، مشخصه‌های نوشته‌شده در تارنمای نشریه است.

۲- مقاله‌ها باید اجزای اصلی مقاله‌های پژوهشی (به ترتیب عنوان، چکیده فارسی، چکیده انگلیسی، واژه‌های کلیدی، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادها) کاربردی، و منابع) را داشته باشد.

۳. مقاله‌ها در نرم افزار ورد ۲۰۰۳ (یا تازه‌تر) به شکل تک‌ستونی نوشته شود.

اندازه‌ی صفحه: ۲۱۰ در ۲۹۷ میلی، متر (A۴)

حاشیه: راست و چپ ۱/۵ سانتی متر، حاشیه‌ی بالا و پایین ۲ سانتی متر

فاصله‌ی سطرها: تک فاصله (Single)

قلم ها:

متن فارسی اصل و چکیده‌ی مقاله: ۱۲ B Nazanin
عنوان فارسی مقاله: ۱۵ B Nazanin Bold (وسط چین)
عنوان انگلیسی مقاله: ۱۴ Times New Roman Bold (وسط چین)
نام‌های نویسندگان در فارسی: ۱۱ B Nazanin Bold (وسط چین)

Times New Roman: نام‌های نویسندگان در انگلیسی

نشریه‌ی علمی «پژوهش‌های آبخیزداری» استادان و متخصصان رشته‌های آبخیزداری و علوم مرتبط را به چاپ مقاله‌های ارزشمند خود دعوت می‌کند. هدف از انتشار این نشریه، فراهم نمودن جایگاهی برای انتشار یافته‌های پژوهش‌های علمی و فنی، و تبادل اطلاعات و نتیجه‌ی آنان میان استادان، دانشمندان و مهندسان ایرانی و جامعه‌ی علمی و حرفه‌ی ملی و بین‌المللی است.

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری به این نشریه مجوز علمی داده است.

گستره‌ی مقاله‌ها

۱- مقاله‌های پژوهشی و اصیل به زبان فارسی نتیجه‌ی پژوهش‌های نویسنده یا نویسندگان، که در نشریه‌ی دیگری در داخل و خارج از کشور چاپ نشده باشد (بیشینه تا ۱۵ صفحه‌ی A۴).

۲- گزارش فنی، به زبان فارسی، (بیشینه تا ۵ صفحه‌ی A۴).

۳- نقد و بررسی مقاله‌های چاپ شده.

هزینه‌ی چاپ

هزینه‌ی چاپ مقاله در این نشریه چهار میلیون ریال است که بر اساس آیین نامه وزارت علوم تحقیقات و فناوری به شماره ۱۶۰۴۲ مورخ اول اردیبهشت ۱۴۰۰، در دو مرحله (پس از داوری و تأیید داوران مبنی بر قابلیت پذیرش، مبلغ دو میلیون ریال، و در هنگام چاپ مقاله، مبلغ دو میلیون ریال) دریافت می‌شود.

اگر قالب نگارش مقاله به‌درستی رعایت نشده باشد، مقاله بی‌آن‌که بررسی شود به نویسنده برگردانده می‌شود. بنابراین توصیه می‌شود برای سرعت‌دادن به داوری و چاپ شدن مقاله‌تان، حتماً قالب آن‌را با دستورکار گفته‌شده تنظیم کنید.

شماره حساب: ۰۳۰۱۴۱۲۲/۳۸۲۰۳۱۰۴۰۰ با شناسهٔ واریز:

شماره: IR۰۳۱۰۰۰۴۰۰۱۰۳۸۲۰۳۰۱۴۱۲۲ به نام: درآمد اختصاصی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، نزد بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران (قابل پرداخت در همه‌ی بانک‌ها)

تذکرہ مهم:

۱۰ (وسط چین)

واژه‌های کلیدی فارسی: ۱۱ B Nazanin

متن چکیده‌ی انگلیسی: ۱۱ Times New Roman

واژه‌های کلیدی انگلیسی: ۱۰ Times New Roman

عنوان بخش‌های مختلف مقاله: ۱۲ B Nazanin Bold

کلمه Abstract و Keywords در چکیده انگلیسی: Times

۱۱ New Roman Bold

عنوان جدول‌ها و شکل‌ها: ۱۱ B Nazanin Bold (وسط چین)

واژه‌ها و عددهای درون جدول‌ها و شکل‌ها: ۱۰ B Nazanin

منابع: ۱۰ Times New Roman

و پیشنهادهای کاربردی، سپاس‌گزاری (اختیاری)، و منابع.

چکیده

خلاصه‌یی از هدف و روش اصلی پژوهش و نتایج کلی به‌دست آمده از آن در بیشینه ۲۰۰ واژه به فارسی و انگلیسی. متن چکیده انگلیسی باید کاملاً با چکیده فارسی یکسان باشد.

واژه‌های کلیدی

سه تا شش واژه‌ی کلیدی به زبان فارسی و انگلیسی (به ترتیب حروف الفبای فارسی و انگلیسی) در انتهای چکیده آورده شود.

مقدمه

این بخش برای نشان دادن ارزش و اهمیت پژوهش و سمت‌وسو دادن به ذهن خواننده، به معرفی موضوع پژوهش، بررسی تحلیلی نوشته‌های پژوهشی مرتبط، و مروری بر کارهای انجام شده‌ی پژوهشگران دیگر در آن زمینه همراه با ارجاع‌های لازم، می‌پردازد. در انتهای مقدمه لازم است هدف (هدف‌های) انجام تحقیق، به‌روشنی بازگو شوند.

مواد و روش‌ها

شرح کامل روش پژوهش و شیوه انجام آزمایش‌ها همراه با جدول‌ها و شکل‌ها و توضیح‌های مربوط به آن‌ها در این بخش می‌آیند. مراحل مختلف انجام تحقیق باید پشت‌سرهم و سلسله‌مراتبی آورده شوند.

در صورت نیاز می‌توان در آغاز بخش مواد و روش‌ها در زیرعنوان «منطقه‌ی پژوهش» یا «جایگاه پژوهش» محل جغرافیایی انجام پژوهش را معرفی کرد، و سپس شرح کامل روش‌ها را در زیرعنوان «روش پژوهش» آورد.

نتایج

در این بخش نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام شده در پژوهش، با تأکید بر یافته‌های جدید آورده می‌شوند.

بحث و نتیجه‌گیری

تفسیر و بحث درباره‌ی نتایج به‌دست آمده و نتیجه‌گیری و جمع‌بندی یافته‌ها با تأکید بر مقایسه با پژوهش‌های مشابه، و تحلیل علمی نتایج به‌دست آمده و دادن پیشنهادها کاربردی.

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 تشکر و قدردانی نمایند.

۴- شکل‌ها و جدول‌ها باید به‌ترتیبی که در متن به آن‌ها اشاره شده است شماره‌گذاری و جا داده شود. عنوان جدول‌ها در بالای آن‌ها، و عنوان شکل‌ها در زیر آن‌ها وسط چین نوشته شود. همه‌ی نوشتار روی شکل‌ها و جدول‌ها باید به فارسی باشد.

۵- همه‌ی رابطه‌های ریاضی باید در سامانه‌ی رابطه‌نویسی Word: Microsoft Equation نگاشته و به‌ترتیب شماره گذاری شود. رابطه‌های ریاضی از سوی چپ سطر نوشته و در سوی راست سطر شماره‌گذاری شود.

نمونه:

$$e=MC^2 \quad ۱$$

۶- خط چهارچوب اطراف نمودارها برداشته شود.

۷- در جدول‌ها تنها خط‌های افقی بالا و پایین ردیف اول و خط افقی پایین ردیف آخر آورده شود.

نمونه:

ردیف	سنجه‌ی الف	سنجه‌ی ب	سنجه‌ی پ
یکم	۱	۱۱	۲۱
دوم	۲	۱۲	۲۲
سوم	۳	۱۳	۲۳

۸- واژگان کلیدی فارسی و انگلیسی به ترتیب حروف الفبای فارسی و انگلیسی باشد.

۹- زیرنویس به‌کار نبرید. اگر لازم است شکل کامل واژه‌ی انگلیسی را در زیرنویس بیاورید، زیرنویس‌ها باید از آغاز تا پایان متن پیوسته (continuous) شماره زده باشد. نام نویسندگان خارجی را در زیرنویس نیاورید.

بخش‌های مقاله

به‌ترتیب: عنوان فارسی، چکیده‌ی فارسی، واژه‌های کلیدی فارسی، عنوان انگلیسی، چکیده انگلیسی، واژه‌های کلیدی انگلیسی، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری

منابع

همه منابع مورد استفاده باید در متن مقاله با نام نویسنده (گان)، به زبان فارسی، و با ذکر تاریخ منبع مورد استفاده، در داخل علامت دو کمان () نوشته شوند. مانند: کوثر (۲۰۱۵)، و یا تامسون و همکاران (۲۰۱۷). اگر منبع استفاده شده در پایان جمله آورده می‌شود، نام نویسنده و تاریخ باید درون دو کمان () نوشته شود. مانند: (احمدی، ۲۰۱۴)، و (برادفورد و همکاران، ۲۰۱۵).
فهرست منابع در پایان مقاله به ترتیب حروف الفبا آورده شود، و هیچ منبعی در زیرنویس آورده نشود.

تذکرات مهم

همه‌ی منابع مورد استفاده در متن مقاله (فارسی و انگلیسی) باید با الفبای انگلیسی و با دستورکار نشریه آورده شود:
۱. پس از نام خانوادگی تنها حرف اول نام کوچک نویسنده‌ها می‌آید و این حرف‌ها با نقطه یا فاصله از هم جدا نمی‌شود. حرف اول تنها در اولین واژه‌ی عنوان مقاله با حروف بزرگ نوشته می‌شود.
۲. پس از نام نویسنده سال انتشار می‌آید. سپس یک نقطه، عنوان مقاله، نام مجله، یک نقطه، شماره‌ی مجلد نشریه، شماره‌ی انتشار در داخل دو کمان ()، یک نشانه‌ی دوقطه (:)، و صفحه‌های مقاله آورده می‌شود. برای نوشتن شماره‌ی صفحه، همه‌ی شماره‌ها را بیاورید: (۱۰۳۷-۴۵، نه ۴۵-۱۰۳۷). برای فاصله‌ی میان دو شماره‌ی صفحه از فاصله‌ی متوسط (خطِ ان) - به جای خط تیره - استفاده کنید (نادرست: ۲۳۵-۲۵۰، درست: ۲۵۰-۲۳۵).

نمونه‌هایی از منابع ارجاع شده

مقاله انگلیسی با یک نویسنده

Rahimikhoob A. 2008. Comparative study of Hargreaves's and artificial neural network's methodologies in estimating reference evapotranspiration in a semiarid environment. *Irrigation Science*, 26(3): 253-259.

مقاله انگلیسی با دو نویسنده و بیشتر

Berengena J, Gavilan P. 2005. Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment. *Irrigation and Drainage Engineering*, 131(2):147-163.

مقاله فارسی دارای چکیده انگلیسی

Naderi N, Mohseni Saravi M, Malekian A, Ghasemian D. 2011. Analytical Hierarchy Process technique for deciding watersheds.

ارجاع در متن:

روش این نشریه بر اساس توصیه‌های شورای ویراستاران علمی (سی‌اس‌ای)،

(<http://www.councilscienceeditors.org>)

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.

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 فاصله‌ی خالی بگذارید، اما ویرگول نگذارید:
تازه‌ترین پژوهش بر شدت بارندگی در این منطقه (سیپیون، ۲۰۱۵) نشان می‌دهد که ...

۲. اگر نام نویسنده بخشی از جمله است، تنها تاریخ را در دو کمان () بگذارید:

هاگیهارا و اینو (۲۰۱۴) دریافتند که ...

۳. کار انجام شده بیش از دو نویسنده: نام نویسنده‌ی اصلی، سپس عبارت "و همکاران" و بعد تاریخ را بنویسید.
(هاگیهارا و همکاران، ۲۰۱۳)

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:

وایل (۱۹۷۸، ۱۹۸۰، ۱۹۸۳) 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.
راش (۲۰۰۰الف، ۲۰۰۰ب) پذیرفت که ...

۶. کارهایی که یک سازمان به جای نویسنده منتشر کرده است: نام سازمان یا گروه را پیش از تاریخ چاپ بنویسید.
اندازه‌های دقیق مصرف آب در ایالت‌های مختلف به تازگی منتشر شده است (خدمات ملی آمار کشاورزی، ۲۰۰۰).

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.

پایان نامه

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 pages. (In Persian)

Journal of Environment and Development, 4(2): 41–50. (In Persian).

کتاب انگلیسی

Subramanya K. 1994. Engineering Hydrology. Tata McGraw–Hill Education.

فصلی از کتاب ویراسته

Castejon M, Romero–Munoz F, Garcia L. 1987. Phenology and control of Orobanche cernua in sunflower with glyphosate. In: Weber HC, Forstreuter W, Editors. Parasitic flowering plants. Marburg, F.R.G., pp. 121–126.

صفحه اینترنتی

Watershed Management Research Journal

Founder: Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO)- Fars
Agricultural and Natural Resources Research and Education Center
ISSN: 2981-2313 Vol. 37, No. 4, Ser. No. 145, Winter 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

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

145

ISSN: 2981-2038 Vol. 37, No. 4, Ser. No. 145, Winter 2025

- **Investigation of Effective Factors Role on 18 March 2019 Floods of the Kiakola in Mazandaran Province by HEC-RAS Model**
Valiollah Karimi, Mohammad Ali Hadian Amri 2
- **Investigation and Identification of Desert Pavements in Semnan Township Using Images of the ETM+ Sensor**
Harir Sohrabi, Hayedeh Ara, Mohammadkia Kianian, Amin Salehpour Jam 15
- **Impact of Climate Change on Precipitation Extremes Indices over Iran**
Sepideh Choobeh, Behnoush Farrokhzadeh, Ommolbanin Bazrafshan, Haniyeh Hasanvand 34
- **An Analysis on the Precipitation Barycenter in the Network of Rain Gauge Stations of Ardabil Province**
Zeinab Hazbavi, Vahideh Moradzadeh, Mahin Hanifepour, Nazila Alaei 54
- **Evaluation of Gully Erosion Threshold Using Weight of Evidence (WofE) and Dempster-Schiffer (DSH) Models in Ilam Watershed**
Shamsolah Asgari, Kourosh Shirani, Faridoun Slimani 71
- **Evaluation of the Role of Rainfall Characteristics and Prescribed Fire on the Runoff and Leaching of Soil Nutrients in the Chogha Sabz Park, Ilam**
Tahereh Arghand, Noredin Rostami, Mehdi Heydari, Morteza Gheysouri 99
- **Validation of the Use of Synthetic Colour-Contrast Aggregates for Estimation Splash and Surface Erosion**
Reza Zarei, Mostafa Adami, Abdulvahed Khaledi Darvishan 119
- **Assessment of Surface Water Resources of Poldokhtar Due to Drought Impacts**
Massoud Goodarzi, Rahim Kazemi 135