سال پانزدهم، شماره ۱، پیاپی ۵۷، بهار ۱۴۰۵

(نشریه علمی)

مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی



دانشگاه فردوسی مشهد، شاپا: ۲۳۲۲-۱۶۸۲

فصلنامه
جغرافیا و مخاطرات محیطی
(نشریه علمی)

سال پانزدهم، شماره یک، پیاپی پنجاه و هفتم، بهار ۱۴۰۵

شاپا چاپی: ۱۶۸۲-۲۳۲۲ شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۳۰۷۶

عنوان

ارزیابی اثر تغییرات کاربری اراضی بر موفولوژی رودخانه و پیامدهای آن بر تشدید خطرپذیری سیلاب (مطالعه موردی: رودخانه قره سو- اردبیل)

مسعود رحیمی؛ مهرداد وهاب زاده زرگری

تحلیل الگوی نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده رودخانه در حوضه‌های منتخبِ منشور بَرآفزایشی مکران

رضا منصوری

ارزیابی کیفیت ژئومورفولوژیکی رودخانه نیرچای استان اردبیل با استفاده از روش MQI

بهروز نظافت تکله؛ فریبا اسفندیاری درآباد؛ رئوف مصطفی زاده؛ موسی عابدینی

ارزیابی فرونشست دشت مرند با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR)

شهرام روستایی؛ سیداسدالله حجازی؛ داود مختاری؛ داود امانی

بررسی پویایی جامعه میکروبی خاک در سنین مختلف تاغ‌کاری در اکوسیستم‌های خشک بیرجند، شرق ایران

مرتضی صابری؛ محمدرضا دهمرده قلعه نو؛ رسول خطیبی؛ مهدی سرپرست

بررسی تغییرات زمانی و مکانی آلودگی آب زیرزمینی دشت یزد–اردکان با استفاده از شاخص آلودگی آب زیرزمینی (PIG)

سمیه سلطانی گردفرامرزی؛ زهرا رحمانی سامانی

ارزیابی عدم قطعیت عمق برف بازتحلیل شده در شمال غرب ایران با استفاده از ERA5-Land و MERRA-2

برومند صلاحی؛ علی شاهی

بررسی ارتباط بین الگوهای رودباد و فرین‌های دمایی سرد در ایران

ناهید محمدی؛ فیروز مجرد؛ جعفر معصوم‌پور سماکوش

چشم انداز آینده بارش پهنه‌های ارتفاعی ایران

الهام سلحشور؛ رضا دوستان؛ ایمان بابائیان

بررسی تأثیر لکه‌های سبز و ویژگی‌های بیوفیزیکی سطح بر الگوی جزایر حرارتی شهری با استفاده از سنجش از دور و GIS (مطالعه موردی: موصل در سال ۲۰۲۴)

ابراهیم سامی؛ محمد صالح سیش؛ کیوان محمدزاده

کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در مدیریت خطر سیلاب با تأکید بر سکونتگاه‌های روستایی گردشگرپذیر (مطالعه موردی: منطقه نمونه گردشگری بیستون، استان کرمانشاه)

فرهاد جوان؛ داود جمینی؛ رامین آتش بهار

تحلیل پیشران‌های کلیدی اثرات هوشمندسازی بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی با رویکرد آینده‌پژوهی (موردمطالعه: شهرستان‌های فردوس، بشرویه و سرایان)

علی اکبر عنابستانی؛ نبی الله طاهری؛ پگاه مریدسادات

دانشکده ادبیات و علوم انسانی

فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوس مشهد

مدیر مسئول: دکتر سید رضا حسین زاده

سردبیر: دکتر سید رضا حسین زاده

هیئت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

Prof. Victor R. Baker (Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona)
Prof. Ziyadin Çakir (Department of Geology, Istanbul Technical University)
Prof. Gao-Lin Wu (Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences)
Assistant Prof. Masoud Irannezhad (Civil Engineering University of Oulu, Finland)
Assistant Prof. Dimitris G. Kaskaoutis(Chemical Engineering University of Western Macedonia: Kozani, Greece)
Professor.Mingrui Qiang(Arid Environment and Climate Change Lanzhou University Lanzhou, China)

حمید اجتهادی– استاد گروه زیست شناسی، دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد
محمد رضا اصفهانی – استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد
مرتضی اکبری – دانشیار بیابان زدایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد
علیرضا راشکی – استاد بیابان زدایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد
آذر زرین –دانشیار اقلیم شناسی گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه فردوسی مشهد
شعبان شتایی جویباری –استاد سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
حسین شفیع زاده مقدم–دانشیارمهندسی و مدیریت آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

بختیار فیضی زاده –دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS دانشگاه تبریز
منیژه قهرودی تالی– استاد جغرافیای طبیعی – ژئومورفولوژی دانشگاه شهید بهشتی تهران
علیرضا کریمی – استاد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد
غلامرضا لشکری پور- استاد گروه زمین شناسی، دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد
حسین محمدزاده– استاد گروه زمین شناسی، دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد
ابوالفضل مسعودیان– استاد اقلیم شناسی گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه اصفهان
مسعود میرزائی شهرابی–استاد شیمی معدنی گروه شیمی، دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد
مسعود مینائی – دانشیار سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه فردوسی مشهد دانشگاه فردوسی مشهد
خلیل ولیزاده کامران– استاد، گروه سنجش از راه دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز
احمد نوحه‌گر– استاد گروه برنامه ریزی مدیریت و آموزش محیط زیست دانشگاه تهران
مجتبی یمانی– استاد جغرافیا – ژئومورفولوژی گروه جغرافیا طبیعی دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران

مقالات نمودار آرای نویسندگان است و به ترتیب وصول و تصویب درج می‌شود.

براساس آئین‌نامه کمیسیون نشریات وزارت علوم تحقیقات و فناوری از سال ۱۳۹۸، کلیه نشریات دارای درجه " علمی- پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند.

این نشریه حاصل فعالیت مشترک دانشگاه فردوسی مشهد، انجمن ایرانی ژئومورفولوژی و انجمن کواترنری ایران است.

مدیر داخلی: دکتر مسعود رحیمی
ویراستاری انگلیسی: دکتر مهدیه غیور بلورفروشان
ویراستاری علمی: دکتر سید رضا حسین زاده
ویراستاری ادبی: انسیه سبک‌خیز خیاط
کارشناس اجرایی، حروف نگاری، صفحه آرایی و طراحی جلد: دکتر مهدیه غیور بلورفروشان
عکس جلد: https://www.weather-forecast.com

براساس سیاست دانشگاه فردوسی مشهد این نشریه به صورت الکترونیکی چاپ می‌شود و هیچ نسخه کاغذی ندارد.

نشانی: مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی، کد پستی: ۹۱۷۷۹۴۸۸۸۳
نشانی اینترنتی: https://geoeh.um.ac.ir/ E-mail: geo.eh@um.ac.ir

شماره پروانه: ۳/۲۷۱۱۱۶- این مجله در نشست کمیسیون بررسی نشریات علمی کشور مورخ ۱۳۹۰/۱۲/۱۰ ، رتبه علمی- پژوهشی دریافت کرده است.

این مجله در پایگاه های زیر نمایه می‌شود:
پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC)
پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)
پایگاه بانک اطلاعات نشریات کشور (Magiran)
DOAJ (Directory of Open Access Journals)
EBSCO
Google Scholar

بسم الله الرحمن الرحیم

فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی

(نشریه علمی)

سال پانزدهم، شماره پنجاه و هفتم، بهار ۱۴۰۵

شاپا چاپی: ۱۶۸۲-۲۳۲۲

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۳۰۷۶

اهداف

نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی یک نشریه تحقیقاتی میان رشته‌ای، ایرانی است که موضوعات جغرافیایی مانند درجه خطرپذیری جغرافیایی مناطق، قرار گرفتن انسان در معرض خطر، آسیب‌پذیری، آگاهی، واکنش به بلایا و برنامه‌ریزی برای تعدیل تأثیر مخاطرات زیست محیطی را برجسته می‌کند.

نقش مخاطرات در تأثیرگذاری بر فرآیند توسعه به ویژه در کشورهای در حال توسعه و مسائل مربوط به کارایی، عدالت اجتماعی و پایداری نیز در نشریه مورد بحث قرار گرفته است.

حوزه های موضوعی

این نشریه از مقالات اصلی، پژوهشی، مقالات مروری، مقاله کوتاه، مطالعه موردی، روش‌شناسی و مقالات کاربردی دارای کیفیت بالا با موضوعات زیر استقبال می‌کند:

۱. خطرات زمین‌شناختی و ژئومورفولوژیکی: زمین‌لرزه‌ها، روانگرایی خاک، فوران‌های آتشفشانی، لاهارها، سونامی‌ها، فرونشست زمین، زمین لغزش‌ها، گسترش جانبی، جریان‌های گلی، ریزش سنگ‌ها، جریان‌های آواری، بهمن‌ها، واگرایی خاک و...
۲. خطرات هیدرولوژیکی-ژئومورفولوژیکی: سیلاب، آب‌گرفتگی، نوسانات سطح دریا، فرسایش ساحلی، فرسایش آبی، فرسایش بادی، جابجایی تپه‌های ماسه‌ای، هوازدگی نمکی، نفوذ آب شور، بیابان‌زایی و شوره‌زایی.
۳. خطرات اقلیمی و جوی: تغییرات اقلیمی، طوفان‌های گرد و غبار، هبوب، طوفان‌های آتش، کولاک‌ها، گردبادها، شرایط اقلیمی شدید، خشکسالی‌ها، یخ‌زدگی شدید، موج‌های گرما، مه، صاعقه، پرتوهای کیهانی، پرتوهای فرابنفش.
۴. خطرات زیست‌فیزیکی و زیستی: آتش‌سوزی‌های طبیعی جنگل، سرمازدگی‌های کشاورزی، آلرژی‌ها، ویروس‌ها، مسمومیت‌های غذایی، اپیدمی‌ها، بیماری‌های خاص مانند سرطان، بیماری‌ها و آفات گیاهی، هجوم حشرات.
۵. خطرات فناوری: آلودگی هوا، خاک و آب، آلودگی صنعتی، آلودگی شیمیایی، آلودگی صوتی، تشعشعات اتمی، ضایعات الکترونیکی، زباله‌های هسته‌ای، شکست سدها، حوادث حمل‌ونقل، آتش‌سوزی‌ها، نشت مواد شیمیایی و ساخت و ساز انسانی.
۶. خطرات اجتماعی و فرهنگی: مشکلات سلامت روان، خشم، استرس و افسردگی، درگیری‌های قومی و اجتماعی، سرقت، اعتیاد به مواد مخدر، جنگ‌های زمینی، جنگ‌های نرم، درگیری‌های سیاسی، اختلافات مرزی، رفتارهای پرخطر، خطرات شهری و روستایی.
۷. مدیریت خطرات محیط‌زیستی :مدیریت بحران، مدیریت فعال، مدیریت غیرفعال، نجات و امدادرسانی، بازسازی پس از بحران، برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات.

راهنمای تدوین و نحوه ارسال مقاله برای چاپ در فصلنامه علمی-پژوهشی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

نشریه **جغرافیا و مخاطرات محیطی** به دلیل تخصصی بودن فقط در موضوعات مرتبط با مخاطرات محیطی (طبیعی و انسانی) پذیرای مقالات می‌باشد. مقاله‌ها باید حاصل کار پژوهشی نویسنده (یا نویسندگان) باشند و قبلاً در نشریه دیگری اعم از داخلی و خارجی و یا مجموعه مقالات همایش‌ها به چاپ نرسیده باشند و همچنین به طور همزمان برای نشریه دیگری نیز ارسال نشده باشند.

نحوه دریافت مقاله‌ها:

سیستم ارسال آنلاین: نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی تنها مقالاتی را در دستور کار قرار می‌دهد که از طریق وب سایت نشریه به نشانی https://geoeh.um.ac.ir/author ارسال شده باشند.

زبان و سبک: زبان مقالات مورد پذیرش نشریه فارسی به همراه چکیده ساده انگلیسی (حداکثر ۲۰۰ کلمه) و چکیده مبسوط انگلیسی (بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ کلمه) می باشد.

انواع مقالات:

- مقالات پژوهشی اصلی
- مروری
- مقالات کوتاه
- یادداشت‌های فنی یا مقالات روش‌شناسی
- مطالعات موردی

تبصره:

مقاله‌های ارائه شده در همایش‌ها و مجامع علمی مشروط به اینکه با تغییرات قابل توجه و افزودن مطالب جدید همراه باشد، قابل بررسی خواهد بود.

مقاله‌های مروری که پیشرفت‌های جدید در موضوعات نشریه را در بر می‌گیرد، از نویسندگان مجرب و دارای مقالات پژوهشی در زمینه مورد نظر پذیرفته می‌شود.

آماده‌سازی مقاله

برای دریافت اطلاعات تکمیلی در خصوص نحوه نگارش بخش‌های مختلف مقاله نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی اینجا کلیک کنید.

بارگذاری فایل‌های تعارض منافع و تعهدنامه در زمان ارسال مقاله الزامی می باشد.

الزامات قالب‌بندی:

ساختار مقاله شامل بخش‌های زیر می باشد:

چکیده مبسوط انگلیسی شامل (Introduction (Purpose, literature review, …), Materials and Methods, Results and Discussion, Conclusion)، عنوان، چکیده، کلمات کلیدی، مقدمه، منطقه مورد مطالعه، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری، منابع

نکته مهم: به منظور بررسی دقیق صحت چکیده مبسوط انگلیسی، حتما هم متن فارسی و هم انگلیسی چکیده مبسوط ارسال شود.

محدودیت‌های تعداد کلمات :

- **متن اصل مقاله** :۳۰۰۰ تا ۷۰۰۰ کلمه
- **چکیده مبسوط انگلیسی**: ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ کلمه
- **کلمات کلیدی**: حداقل ۳ و حداکثر ۵ عدد

- **تعداد منابع مقاله:** برای مقالات پژوهشی بین ۲۰ تا ۵۰ و برای مقالات مروری بین ۵۰ تا ۳۰۰ منبع

راهنمایی در مورد فونت، حاشیه‌ها، فاصله‌گذاری خطوط و شماره‌گذاری صفحات:

- متن مقاله روی کاغذ A4 بدون هر گونه آرم و نشان و به‌صورت تک‌ستونه ارسال شود.
- کلیه صفحات مقاله باید دارای شماره بوده و تعداد صفحات مقاله پس از حذف جداول و شکل ها از ۱۵صفحه تجاوز نکند.
- حاشیه صفحه‌ها از بالا ۳/۵، از پایین ۳/۵، از راست و چپ ۳ سانتی‌متر باشد و فاصله سطرها Single تنظیم شود.
- پاورقی در هر صفحه به‌صورت مستقل با شماره‌گذاری از یک آغاز شود.
- تیترهای اصلی و فرعی شماره نداشته باشند.
- تمام اعداد و ارقام در متن فارسی باشد و در صورت اعشاری بودن اعداد، ممیز به صورت (/) نوشته شود (اعداد فقط در جدول‌ها و شکل‌ها به انگلیسی است).
- توضیح شکل‌ها (زیرنویس) و توضیح جدول‌ها (بالانویس) به دو زبان فارسی و انگلیسی باشد (در فارسی و انگلیسی مطابق هم باشند).
- استنادهای درون متنی و منابع انتهای مقاله به زبان انگلیسی باشند (کلیه پرانتزهای باز و بسته استنادهای درون متنی با فونت فارسی باشد).
- در کل متن، نیم‌فاصله‌ها رعایت شود.
- فهرست‌های عددی یا بولتی (توپی خالی) نیم‌سانتی‌متر قبل از متن تورفتگی بخورد.
- عنوان هر بخش یا زیربخش، با یک سطر خالی فاصله از انتهای متن بخش قبلی تایپ شود. در متن مقاله از شماره‌گذاری عنوان‌ها خودداری فرمایید.

فونت

- کلیه کلمات فارسی مقاله با قلم فارسی B Nazanin نوشته شود.
- کلیه کلمات انگلیسی مقاله با قلم Times New Roman نوشته شود.
- عنوان فارسی با اندازه ۱۶ و انگلیسی مقاله با اندازه ۱۴ نوشته شود.
- عنوان‌های اصلی با اندازه ۱۲ توپر (Bold) نوشته شود.
- متن مقاله با اندازه ۱۲ تایپ شود.
- کلمات لاتین داخل متن با اندازه ۱۰ نوشته شود.
- تمامی اسامی علمی به‌صورت ایتالیک درج شوند.
- عناوین شکل‌ها و جدول‌ها به دو صورت فارسی و انگلیسی به‌ترتیب با اندازه ۱۱ و ۱۰ نوشته شود.
- شماره جدول و شکل به‌صورت توپر (Bold) بوده و کلیه شکل‌ها و جدول‌ها بدون کادر باشند.
- عناوین محورها در همه نمودارها و یا شکل‌ها یکسان و اندازه قلم آن‌ها از ۸ کوچکتر و از ۱۱ بزرگتر نباشد.
- پاورقی در هر صفحه به‌صورت مستقل با شماره‌گذاری از یک آغاز شود و فونت آن برای زبان فارسی B Nazanin, 10 و زبان انگلیسی Times New Roman, 9 .

راهنمایی برای شفافیت و اختصار:

- از حروف اختصاری بیش از حد استفاده نشود.
- وقتی حروف اختصاری برای اولین بار در یک متن به کار می روند، شکل کامل آن را درج کنید.
- چنانچه در چکیده و هم در کل مقاله از یک عبارت اختصاری استفاده کرده‌اید، عبارت اختصاری باید دو بار معرفی شود: یک بار در چکیده و بار دیگر وقتی برای اولین بار در متن اصلی ظاهر شده است.

جداول:

- جداول باید به صورت متن قابل ویرایش ارسال شوند نه به صورت تصویر.
- جداول را در کنار متن مربوطه یا در صفحه(های) جداگانه در انتهای مقاله خود قرار دهید.
- به تمام جداول در متن اشاره شود.
- جداول را با توجه به ظاهر شدن آن ها در متن به صورت متوالی شماره گذاری کنید.
- زیرنویس را به همراه جداول ارائه دهید.
- هر یادداشت در خصوص جدول را در زیر بدنه جدول قرار دهید.
- از قوانین عمودی و سایه زدن در سلول‌های جدول اجتناب کنید.
- جداول و نمودارها واضح باشند و ساختار مناسبی(light shading) باشد نه (table grid) داشته باشند و از اکسل کپی و چسبانده نشوند.
- در جدول‌های مورد استفاده از منابع دیگر، ارجاع درون و برون متنی ضروری می‌باشد.
- عنوان جدول‌ها بایستی بالای جدول وسط چین، B Nazanin 11 Bold و متن داخل جدول B Nazanin 10 باشد.
- برای تمامی اطلاعات نوشته شده به زبان فارسی در داخل جداول در همانجا معادل انگلیسی هم ذکر گردد.
- عنوان انگلیسی جدول‌ها نیز بایستی در زیر عنوان فارسی آن ها وسط چین، Times New Roman 10 Bold باشد.

شکل‌ها و تصاویر:

- شکل‌ها، تصاویر و ... باید به صورت فایل های جداگانه همراه با متن اصلی ارائه شوند.
- به شکل‌ها و تصاویر در متن مقاله اشاره شود.
- تعداد تصاویر را با توجه به ترتیبی که در مقاله ظاهر می شوند، شماره گذاری کنید.
- هر تصویر به عنوان یک فایل جداگانه با نامگذاری به صورت Fig.1، Fig.2 ارسال شود.
- در شکل‌های مورد استفاده از منابع دیگر، ارجاع درون و برون متنی ضروری می‌باشد
- برای تمامی اطلاعات نوشته شده به زبان فارسی در داخل اشکال(نقشه ها، نمودارها و غیره) در همانجا معادل انگلیسی هم ذکر گردد.
- عنوان انگلیسی شکل‌ها نیز بایستی در زیر آن ها درج شود.

فرمول‌ها و روابط ریاضی

- برای نمایش روابط و فرمول‌های ریاضی از جدول دو ستونی با خطوط نامرئی استفاده شود.
- تمام روابط ریاضی به‌ترتیب از ۱ شماره‌گذاری شوند و شمارهٔ هر رابطه با پرانتز جدا می‌شود.
- روابط باید با اندازه فونت ۱۰ و قلم Times New Roman باشد.

واحدهای اندازه‌گیری

- کلیه واحدهای اندازه‌گیری بر اساس سیستم متریک (SI) باشند.
- برای نوشتن واحدها از حالت نمایی استفاده شود (مثلاً به‌جای m/s از $m\ s^{-1}$ استفاده شود).

منابع

شیوه نامه‌ای که باید در نوشتن منابع مورد استفاده قرار گیرد شیوه نامه انجمن روانشناسی آمریکا(APA) نسخه ۶ است. می‌توان برای افزایش بهره‌وری و راحتی در این‌کار از نرم افزار WORD یا EndNote استفاده کرد. تعداد منابع مورد استفاده در مقاله بایستی برای مقالات پژوهشی بین ۲۰ تا ۵۰ و برای مقالات مروری بین ۵۰ تا ۳۰۰ منبع باشد.

- استناد به منبع در متن مقاله (استنادهای درون‌متنی) و همچنین منابع انتهای مقاله (برون‌متنی) باید به انگلیسی نوشته شود و سال نشر نیز سال میلادی باشد.
- اگر در مقاله از منبع فارسی استفاده شده باشد، باید اطلاعات منبع به زبان انگلیسی برگردانده شود.

- اگر منبع مورداستفاده در مقاله، فارسی باشد؛ برای تبدیل اطلاعات کتابشناختی آن به انگلیسی، باید تمام اطلاعات آن (مانند نام نویسنده (نویسندگان)، عنوان منبع (نام نشریه، کتاب، گزارش، پایان‌نامه) و سایر اطلاعات موردنیاز) از صفحه عنوان انگلیسی یا سایت اینترنتی منبع گرفته شود. از ترجمه شخصی اطلاعات منابع فارسی خودداری نمایید.
- برای استناد به منابعی که نسخه آنلاین دارند، به صفحه انگلیسی سایت منبع مراجعه کنید.
- تمامی ارجاعات داخل متن باید به منبع مربوطه لینک شوند.
- از ذکر منابع بی‌نام و غیرقابل‌دسترس خودداری شود.
- منابع بر اساس حروف الفبای نام نویسندگان آورده می‌شود.
- در منابع انتهای مقاله، نام همه نویسندگان ذکر شود و از آوردن عبارت et al. و others به‌جای آوردن نام سایر نویسندگان منبع، خودداری شود.
- نام منبع (نشریه، کتاب و غیره) و ناشر مخفف نباشد و به‌طور کامل آورده شود.
- برای استناد به مقاله‌هایی که هنوز منتشر نشده‌اند، به‌جای سال نشر از (In press) استفاده شود.
- برای مقاله منتشرشده در نشریه، آوردن شماره نشریه (Issue) و شماره جلد الزامی است (طبق نمونه)، درصورتی‌که در اصل مقاله به شماره نشریه اشاره نشده است، می‌توان شماره را از سایت آن نشریه استخراج کرد.
- منابعی که در اصل به زبان فارسی هستند بعد از برگرداندن به انگلیسی، با درج عبارت [In Persian] در انتها مشخص شوند.
- برای مقاله‌های منتشرشده که DOI دارند، آوردن DOI در پایان هر منبع الزامی است DOI با آدرس دقیق ذکر شود.
- برای کسب اطلاعات بیشتر در خصوص نحوه رفرنس دهی در بخش منابع(انتهای مقالات) اینجا کلیک کنید.

هزینه‌های مرتبط با انتشار

هزینه پردازش مقاله: نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی برای بررسی اولیه مقالات هیچ وجهی از نویسندگان دریافت نمی‌کند. اما مقالاتی که پس از طی کردن فرآیند داوری مورد پذیرش قرار بگیرند باید مبلغ ۶ میلیون ریال بابت هزینه‌های ویراستاری و چاپ مقالات پرداخت نمایند.

دستورالعمل‌های تکمیلی برای نویسندگان:

- مقاله خود را پس از انتشار، در پلتفرم‌های آکادمیک مانند ResearchGate، Academia.edu و Mendeley به اشتراک بگذارید.
- یک شناسه ORCID ایجاد کنید و مقاله خود را به پروفایلتان متصل کنید.
- مقاله خود را در شبکه‌های اجتماعی مانند توییتر، لینکدین و فیسبوک تبلیغ کنید.
- از هشتگ‌های مرتبط استفاده کنید و افراد یا مؤسسات تأثیرگذار در حوزه خود را تگ کنید.
- در ارائه‌های خود به مقاله منتشر شده در این نشریه اشاره کرده و لینک یا DOI آن را ارائه دهید.
- اسلایدهای خود در خصوص مقاله را در پلتفرم‌هایی مانند SlideShare به اشتراک بگذارید.
- مقاله خود را برای همکاران، پژوهشگران و گروه‌های تحقیقاتی مرتبط از طریق ایمیل ارسال کنید و لینک DOI مقاله را در امضای ایمیل خود قرار دهید.

داوران این شماره به ترتیب حروف الفبا

مهدی اسدی استادیار اقلیم شناسی، گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، خراسان جنوبی، ایران

محمد اکبرپور استادیار جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

فریبا اسفندیاری درآباد استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

مرضیه اسماعیل پور استادیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

نظام اصغری پور دشت بزرگ دکتری ژئومورفولوژی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، تهران، ایران

غلامحسن جعفری دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

منصور خیری زاده دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

رضا دوستان دانشیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

مسعود رحیمی استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

یوسف رحیمی قویدل استاد اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

حسین شیرانی استاد گروه علوم خاک، دانشگاه ولیعصر (عج)، رفسنجان، کرمان، ایران

سینا صادق فام دانشیار مهندسی آب، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

وحید صفریان استادیار اقلیم شناسی، گروه آب و هواشناسی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

بهلول علیجانی استاد آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

جمشید عینالی دانشیار جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

علی فتح زاده دانشیار آبخیزداری، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران

حسین فراهانی دانشیار جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

زهرا قصابی استادیار پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

منیژه قهرودی تالی استاد ژئومورفولوژی، *گروه جغرافیا، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران*

فاطمه عین اللهی پیر استادیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

علیرضا کریمی کارویه استاد خاک شناسی، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

ابراهیم مسگری دکتری مخاطرات آب و هوایی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

رئوف مصطفی زاده دانشیار گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

جعفر معصوم پور سماکوش دانشیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

غلامرضا مقامی مقیم دانشیار ژئومورفولوژی ، گروه جغرافیا، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

سعید نگهبان دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

خلیل ولیزاده کامران استاد سنجش از دور، *گروه سنجش از دور و* ***GIS***، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

حسین وحیدی استادیار سنجش از دور و GIS، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

فریبا همتی استادیار ژئومورفولوژی، گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، خراسان جنوبی، ایران

فهرست مندرجات

عنوان	صفحه
ارزیابی اثر تغییرات کاربری اراضی بر موفولوژی رودخانه و پیامدهای آن بر تشدید خطرپذیری سیلاب (مطالعه موردی: رودخانه قره سو- اردبیل) مسعود رحیمی؛ مهرداد وهاب زاده زرگری	۱
تحلیل الگوی نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده رودخانه در حوضه‌های منتخبِ منشور بَرآفزایشی مکران رضا منصوری	۲۳
ارزیابی کیفیت ژئومورفولوژیکی رودخانه نیرچای استان اردبیل با استفاده از روش MQI بهروز نظافت تکله؛ فریبا اسفندیاری درآباد؛ رئوف مصطفی زاده؛ موسی عابدینی	۴۷
ارزیابی فرونشست دشت مرند با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR) شهرام روستایی؛ سیداسدالله حجازی؛ داود مختاری؛ داود امانی	۷۲
بررسی پویایی جامعه میکروبی خاک در سنین مختلف تاغ‌کاری در اکوسیستم‌های خشک بیرجند، شرق ایران مرتضی صابری؛ محمدرضا دهمرده قلعه نو؛ رسول خطیبی؛ مهدی سرپرست	۹۶
بررسی تغییرات زمانی و مکانی آلودگی آب زیرزمینی دشت یزد–اردکان با استفاده از شاخص آلودگی آب زیرزمینی (PIG) سمیه سلطانی گردفرامرزی؛ زهرا رحمانی سامانی	۱۱۴
ارزیابی عدم قطعیت عمق برف بازتحلیل شده در شمال غرب ایران با استفاده از ERA5-Land و MERRA-2 برومند صلاحی؛ علی شاهی	۱۳۲
بررسی ارتباط بین الگوهای رودباد و فرین‌های دمایی سرد در ایران ناهید محمدی؛ فیروز مجرد؛ جعفر معصوم‌پور سماکوش	۱۵۳
چشم انداز آینده بارش پهنه‌های ارتفاعی ایران الهام سلحشور؛ رضا دوستان؛ ایمان بابائیان	۱۷۰
بررسی تأثیر لکه‌های سبز و ویژگی‌های بیوفیزیکی سطح بر الگوی جزایر حرارتی شهری با استفاده از سنجش از دور و GIS (مطالعه موردی: موصل در سال ۲۰۲۴) ابراهیم سامی؛ محمد صالح سیش؛ کیوان محمدزاده	۱۹۳
کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در مدیریت خطر سیلاب با تأکید بر سکونتگاه‌های روستایی گردشگرپذیر (مطالعه موردی: منطقه نمونه گردشگری بیستون، استان کرمانشاه) فرهاد جوان؛ داود جمینی؛ رامین آتش بهار	۲۲۶
تحلیل پیشران‌های کلیدی اثرات هوشمندسازی بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی با رویکرد آینده‌پژوهی (موردمطالعه: شهرستان‌های فردوس، بشرویه و سرایان) علی اکبر عنابستانی؛ نبی الله طاهری؛ پگاه مریدسادات	۲۵۱

بسمه‌تعالی

توافقنامه همکاری علمی

این توافقنامه فی‌مابین مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی و انجمن کواترنری ایران و به‌منظور همکاری در ادامه انتشار نشریه علمی با عنوان. جغرافیا و مخاطرات محیطی در زمینه بررسی مخاطرات محیطی منعقد می‌گردد.

ماده ۱- نشریه به‌صورت فصلنامه و هرسال چهار شماره به زبان فارسی منتشر می‌شود. صاحب‌امتیاز نشریه دانشگاه فردوسی مشهد بوده و اهداف آن عبارت‌اند از: گسترش و ارتقاء پژوهش در سطح کشور، کمک به ایجاد ارتباط و همکاری علمی بین محققین این زمینه در ایران، انتشار نتایج پژوهش‌های علمی.

ماده ۲- امور علمی نشریه را هیأت تحریریه که حداقل یک‌چهارم اعضای آن از اعضای انجمن هستند انجام خواهند داد.

تبصره ۱: انجمن متعهد می‌شود که حداقل دو نفر از اعضای هیأت تحریریه را از اعضای هیأت علمی دانشگاه‌ها انتخاب نماید.

تبصره ۲: یکی از اعضای هیأت تحریریه عضو دانشگاه فردوسی مشهد با پیشنهاد بالاترین مقام صاحب امتیاز و تأیید هیأت مدیره انجمن به عنوان سردبیر نشریه تعیین و با حکم بالاترین مقام صاحب امتیاز به این سمت منصوب خواهدشد. انتخاب سردبیر و اعضای هیأت تحریریه مطابق با آیین‌نامه تعیین اعتبار نشریات علمی کشور صورت خواهد پذیرفت.

ماده ۳- دفتر نشریه در موسسه متقاضی نشریه خواهد بود و با مسئولیت مدیر مسئول اداره خواهدشد.

ماده ٤- روی جلد نشریه علاوه بر نشان دانشگاه فردوسی مشهد نشان انجمن کواترنری ایران با اندازه یکسان چاپ خواهد شد .

ماده ٥- در صفحه حقوقی تمامی شماره‌های نشریه، این جمله آورده شود «این نشریه حاصل فعالیت مشترک دانشگاه فردوسی مشهد و انجمن کواترنری ایران است».

ماده ٦-کلیه هزینه‌های آماده سازی نشریه اعم از هزینه‌های داوری، حق‌الزحمه ویراستار مجری، امور دفتری، پست و مخابرات، تایپ،... برعهده دانشگاه فردوسی مشهد خواهد بود.

ماده ۷- هزینه‌های لیتوگرافی و چاپ نشریه (فیلم و زینگ، کاغذ، چاپ نشریه و جلد، صحافی) به صورت مشترک و با سهم مساوی توسط انجمن و موسسه متقاضی پرداخت خواهدشد.

ماده ۸- هرگاه یکی از طرفین قرارداد مایل به فسخ آن باشد بایستی تصمیم خود را حداقل شش‌ماه زودتر کتباً به اطلاع طرف مقابل برساند. در صورت توافق طرفین به فسخ توافقنامه، نتیجه توسط دبیرانجمن یا مدیرمسئول به دبیرخانه کمیسیون نشریات علمی‌کشور اعلام شود. موسسه متقاضی حداکثر به مدت شش ماه از تاریخ فسخ توافقنامه فرصت دارد تا با تکمیل مدارک و ارسال سه شماره آخر از نشریه به دبیرخانه کمیسیون نشریات علمی کشور، تقاضای اعتبار مستقل نماید تا مراحل ارزیابی نشریه صورت گیرد.

۹- این قرارداد در ۸ ماده و دو تبصره در دو نسخه به مدت ٤ سال تنظیم گردید و در تاریخ ۱۴۰۰/۱۲/۱۵ توسط دکتر احمدرضا بهرامی به نمایندگی از دانشگاه فردوسی مشهد و دکتر فریبرز قریب (رییس هیات مدیره انجمن کواترنری ایران) به امضاء رسید.

دکتر احمدرضا بهرامی
معاون پژوهشی و فن‌آوری دانشگاه فردوسی مشهد

معاونت پژوهش و فناوری

دکتر فریبرز قریب
رییس هیات مدیره انجمن کواترنری ایران

بسمه تعالی

توافقنامه همکاری علمی

این توافقنامه بین مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی و انجمن ایرانی ژئومورفولوژی و به منظور همکاری در ادامه انتشار نشریه (علمی پژوهشی) با عنوان جغرافیا و مخاطرات محیطی در زمینه بررسی مخاطرات محیطی منعقد می‌گردد.

ماده ۱: نشریه به صورت فصلنامه و هر سال چهار شماره به زبان فارسی منتشر می‌شود. صاحب امتیاز نشریه دانشگاه فردوسی مشهد بوده و اهداف آن عبارتند از: گسترش و ارتقاء پژوهش در سطح کشور، کمک به ایجاد ارتباط و همکاری علمی بین محققین این زمینه در ایران، انتشار نتایج نوآورانه پژوهشهای علمی.

ماده ۲: امورعلمی نشریه را هیأت تحریریه، که حداقل یک چهارم اعضای آن از بین اعضای انجمن هستند، انجام خواهند داد.

تبصره۱: انجمن متعهد می‌شود که لااقل دو نفر از اعضای هیأت تحریریه را از اعضای فعال هیأت علمی دانشگاه‌ها انتخاب نماید.

تبصره ۲: یکی از اعضای هیأت تحریریه عضو دانشگاه فردوسی با پیشنهاد بالاترین مقام صاحب امتیاز و تأیید هیأت مدیره انجمن به عنوان سردبیر نشریه تعیین و با حکم بالاترین مقام صاحب امتیاز به این سمت منصوب خواهدشد. انتخاب سردبیر و اعضای هیأت تحریریه مطابق با آیین‌نامه تعیین اعتبار نشریات علمی کشور صورت خواهد پذیرفت.

ماده ۳: دفتر نشریه در موسسه متقاضی نشریه و با مسئولیت مدیر مسئول اداره خواهدشد.

ماده ۴: روی جلد مجله علاوه بر نشان دانشگاه فردوسی مشهد نشان انجمن ایرانی ژئومورفولوژی با اندازه یکسان نیز چاپ خواهدشد.

ماده ۵: در صفحه حقوقی تمامی شماره‌های نشریه، این جمله آورده شود «این نشریه حاصل فعالیت مشترک دانشگاه فردوسی مشهد و انجمن ایرانی ژئومورفولوژی است.

ماده ۶: کلیه هزینه‌های آماده سازی نشریه تا قبل از لیتوگرافی اعم از هزینه‌های داوری، حق‌الزحمه ویراستار، مجری، امور دفتری، پست و مخابرات، تایپ،... برعهده دانشگاه فردوسی مشهد خواهد بود.

ماده ۷: هزینه‌های لیتوگرافی و چاپ نشریه (فیلم و زینگ، کاغذ، چاپ نشریه و جلد، صحافی) به صورت مشترک و با سهم مساوی توسط انجمن و موسسه متقاضی پرداخت خواهدشد.

ماده ۸: هرگاه یکی از طرفین قرارداد مایل به فسخ آن باشد باید تصمیم خود را حداقل شش‌ماه زودتر کتباً به اطلاع طرف مقابل برساند. در صورت توافق طرفین به فسخ توافقنامه، نتیجه توسط دبیرانجمن یا مدیرمسئول به دبیرخانه کمیسیون نشریات علمی کشور اعلام شود. موسسه متقاضی حداکثر به مدت شش ماه از تاریخ فسخ توافقنامه فرصت دارد تا با تکمیل مدارک و ارسال سه شماره آخر از نشریه به دبیرخانه کمیسیون نشریات علمی کشور، تقاضای اعتبار مستقل نماید تا مراحل ارزیابی نشریه صورت گیرد.

۹ـ این قرارداد در ۸ ماده و دو تبصره در دو نسخه به مدت ۴ سال تنظیم گردید و در تاریخ ۱۳۹۸/۸/۲ توسط دکتر احمدرضا بهرامی به نمایندگی از دانشگاه فردوسی مشهد و دکتر مجتبی یمانی (رییس هیات مدیره انجمن ایرانی ژئومورفولوژی) به امضاء رسید.

دکتر مجتبی یمانی
رییس هیات مدیره انجمن ایرانی ژئومورفولوژی

دکتر احمدرضا بهرامی
معاون پژوهشی و فن‌آوری دانشگاه فردوسی مشهد

معاونت پژوهش و فناوری

Vol. 15, No. 1, Spring 2026, p. 1-22 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.95345.1607 OPEN ACCESS

Assessment of Land-Use Changes Impact on River Morphology and Its Implications for Increasing Flood Hazard (Case Study: Qara -Su River, Ardabil)

Masoud Rahimi [1]*, Mehrdad Vahabzadeh Zargari [2]

[1] Geography Department, Faculty of Literature and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
[2] Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 09 September 2025

Revised: 17 November 2025

Accepted: 26 November 2025

Available Online:

27 November 2025

Keywords:

Land-Use Change

River Morphology

Floodplain Dynamic

River Channel Dynamics

Flood Hazard Assessment

ABSTRACT

This paper investigates the impact of land-use changes on the channel morphology of the Qara-Su River and its consequences. The extraction of land-use maps was carried out using Landsat (2005) and Sentinel-2 (2024) satellite imagery. Subsequently, the effects of these changes on the river width, channel bed area, and the migration of the river's centerline were examined. The results indicated that over the past 19 years, agricultural land-use within the river's floodplain has expanded (e.g., 116 hectares in the first reach, 252 hectares in the second reach, and 203 hectares in the third reach). This expansion reflects the encroachment of agricultural activities into the riparian zone and even the active channel of the Qara-Su River. Furthermore, the analysis of river width changes at 38 selected cross-sections along the Qara-Su River clearly revealed a reduction in river width over the past 19 years. Measurements conducted on these 38 cross-sections indicated that the most frequent river width of the Qara-Su River was approximately 13 meters in 2005, while in 2024, the most frequent width decreased to around 4 meters. These changes thus indicate a significant narrowing of the river channel, which consequently reduces its capacity to discharge surface flows. Therefore, the risk of destructive flooding and the vulnerability of agricultural lands along the river's riparian zone are expected to increase significantly in the future. Consequently, attention to land-use changes in the Qara-Su River floodplain and the development of a comprehensive plan for managing human activities within the riparian areas and the river bed should be considered a primary priority for the relevant authorities.

* Corresponding author: Masoud Rahimi E-mail address: Masoudrahimi@um.ac.ir

How to cite this article: Rahimi, M., & Vahabzadeh Zargari, M. (2026). Assessment of Land-Use Changes Impact on River Morphology and Its Implications for Increasing Flood Hazard (Case Study: Qara -Su River, Ardabil). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 15*(1), 1-22. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.95345.1607

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Rivers, as fundamental components of the hydrological cycle, play a crucial role in sustaining ecosystems and flood control. They are vital elements of terrestrial water systems and serve as the primary conveyors of surface water resources. Globally, areas near rivers are preferred for agricultural development and population settlement, and human civilization prospers along rivers (Wang et al., 2022). Land-use changes, such as urbanization and agricultural expansion, can significantly alter the morphological dynamics and hydrological behavior of rivers. River morphology plays a crucial role in channel stability, flood control, and ecological conservation, and changes in river morphology can have multifaceted impacts on the surrounding environment and society. These impacts include changes to river and adjacent ecosystems, shifts in the distribution and availability of water resources, and hydrological hazards in nearby and downstream areas (Qiang et al., 2007; Chakraborty and Datta, 2013; Ospide et al., 2017). The application of advanced technologies, such as remote sensing, GIS, and hydromorphological modelling, is essential for the analysis and management of river systems. The Qara-Su River in Ardabil Province has experienced significant physical changes due to the expansion of agricultural lands within its bed and riparian zones. Investigating the impacts of these land-use changes on river morphology is essential for the conservation of natural resources and the implementation of sustainable management strategies.

Material and Methods

In this study, multiple data sources were utilized to analyze land-use changes and the morphology of the Qara-Su River. Topographic and geological maps, ALOS-PALSAR elevation data, Sentinel-2, Landsat, and IRS satellite imagery were employed to generate a Digital Elevation Model (DEM), extract stream networks, and assess land-use changes. Hydrological data, including daily discharge and sediment load, were obtained from the Ardabil Regional Water Company and field surveys and were incorporated into the analysis. Data processing and analysis were carried out using software tools such as ArcGIS, ENVI, Sas Planet, Google Earth, HEC-RAS, and related plugins. Field data were controlled and validated with GPS. For land-use classification, a supervised classification method using the maximum likelihood algorithm was applied, with classification performed for both images based on 128 training samples. To quantify river width changes, the Lateral Mobility Index can be applied. This index is calculated by measuring changes in the outermost bankline of the channel (Richard, 2005):

$$\text{Lateral Mobility Index} = \frac{\text{Change Active Channel Area}}{\text{Previous Active Channel Area}} * 100 \quad (1)$$

In this context, a value close to 100% indicates the maximum lateral changes of the river, while a low value of this index represents minimal lateral changes. For calculating lateral migration rates was offered by Shields et al. It uses the following equation (Giardino and Lee 2011; Shields et al. 2000):

$$Rm = (A / L) / y \quad (2)$$

Where Rm refers to lateral migration rate, A is the area between two centerlines of the channel, L is the length of centerline at time t1, and y is the number of years. The lateral stability of the channel is determined by the changes in the river's active channel without vegetation during the study period. In other words, the lateral stability index is calculated by dividing the unchanged active channel area by the previous active channel area:

$$\text{Lateral Stability Index} = \frac{\text{Unchange Active Channel Area}}{\text{Previos Active Channel Area}} \quad (3)$$

When the output of this index approaches one, it indicates that the channel has remained in place, while values closer to zero reflect changes in the channel over the study period (Richard et al., 2005a, b).

Results and Discussion

In this paper, land-use changes and the morphology of the Qara-Su River over the past 19 years were investigated. The results indicated that between 2005 and 2024, agricultural activities within the floodplain of the river, particularly in its bed and riparian zone, have significantly increased. In certain reaches, such as the first reach, 116 hectares, and in the second reach, 251 hectares of agricultural land were expanded. These changes have led to the narrowing of the river channel and a reduction in the river's flood conveyance capacity. For example, in 2024, the average width of the river channel in certain reaches decreased from 13 meters in 2005 to 3 meters. The construction of the Sabalan Dam has not only reduced the river's discharge and induced morphological changes downstream but also resulted in the stabilization of sediment bars and a further reduction in the channel width. These changes have led to a reduction in the river's lateral dynamics and an increased risk of major floods with return periods exceeding 10 years. Consequently, the diminished conveyance capacity and the potential for overbank flow into the floodplain pose significant threats to agricultural lands and downstream areas. The results showed that over the past 19 years, the river migration rate in different intervals ranged from 0.29 to 0.52 m/year, with an overall average of 0.44 m/year. The river area decreased from 80.04 ha in 2005 to 26.02 ha in 2024, indicating channel narrowing and a reduction in river width. Additionally, the lateral stability index for the intervals was calculated to range between 0.16 and 0.32, with an overall average of 0.22 for the river. The lateral change index ranged from 71% to 85% across different reaches, indicating significant lateral changes of the river. Even in areas with geological control, high values of the index correspond with a reduction in river width.

Conclusion

The present study investigates land-use changes in the floodplain of the Qara-Su River over the period from 2005 to 2024. The results indicate that these changes have occurred rapidly, leading to the narrowing of the river channel and a reduction in its water conveyance capacity. Satellite image analysis, with classification accuracies of 93% for 2024 and 91% for 2005, reveals an expansion of agricultural areas within the river's riparian zone and active channel, which has contributed to the stabilization of vegetation along the riverbanks. The construction of the Sabalan Dam upstream has led to reduced river discharge and an increased risk of severe floods with return periods exceeding 10 years. These changes have increased the vulnerability of the floodplain to flooding and reduced its flow conveyance capacity. Therefore, it is essential to closely monitor land-use changes within the floodplain of the Qara-Su River and to develop a comprehensive plan for managing human activities in its riparian zone, which should be considered a primary priority. For effective river management, it is recommended that policies such as annual land-use monitoring and the enforcement of agricultural restrictions along the riverbanks be implemented.

جلد ۱۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۲۲-۱
ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076
نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی
مقاله پژوهشی
DOI: 10.22067/GEOEH.2025.95345.1607
دسترسی آزاد

ارزیابی اثر تغییرات کاربری اراضی بر موفولوژی رودخانه و پیامدهای آن بر تشدید خطر سیلاب (مطالعه موردی: رودخانه قره سو، اردبیل)

مسعود رحیمی[1*]، مهرداد وهاب‌زاده زرگری[2]

[1] گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
[2] گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۵

کلمات کلیدی:
تغییرات کاربری اراضی
ژئومورفولوژی رودخانه
پویایی دشت سیلابی
پویایی مجرای رودخانه
ارزیابی مخاطره سیلاب

چکیده

این پژوهش به بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر مورفولوژی مجرای رودخانهٔ قره‌سو و پیامدهای ناشی از آن می پردازد. استخراج نقشه کاربری اراضی بر اساس تصاویر ماهواره‌ای Landsat (2005) و Sentinel-2 (2024) صورت گرفته است. در ادامه تأثیر این تغییرات بر عرض رودخانه، مساحت بستر رودخانه و نیز جابه‌جایی خط مرکزی رودخانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که در طی ۱۹ سال اخیر وسعت کاربری کشاورزی در محدودهٔ دشت سیلابی رودخانه (برای مثال بازهٔ اول ۱۱۶ هکتار، بازهٔ دوم ۲۵۲ هکتار و بازهٔ سوم ۲۰۳ هکتار) افزایش داشته است که این موضوع نشان دهندهٔ پیش‌روی فعالیت‌های کشاورزی به بخش‌های حریم و حتی بستر فعال رودخانه قره‌سو بوده است. همچنین نتایج بررسی تغییرات عرض رودخانهٔ قره‌سو در ۳۸ مقطع عرضی انتخابی در طول مسیر رودخانه، کاهش عرض رودخانه در طی ۱۹ سال اخیر را به‌طور واضح نمایان ساخت. اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی این ۳۸ مقطع عرضی نشان داد که بیشترین فراوانی عرض رودخانهٔ قره‌سو در سال ۲۰۰۵ نزدیک ۱۳ متر و همچنین بیشترین فراوانی عرض رودخانه در سال ۲۰۲۴ نزدیک ۴ متر بوده است. بر این اساس این تغییرات بیانگر وقوع تنگ‌شدگی شدید در بستر رودخانه بوده که پیامد آن، کاهش ظرفیت عبور جریان‌های سطحی است. در نتیجه، احتمال بروز سیلاب‌های مخرب و افزایش آسیب‌پذیری اراضی کشاورزی حاشیهٔ رودخانه در آینده به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت. از این رو لزوم توجه به تغییرات کاربری اراضی در دشت سیلابی رودخانهٔ قره سو و تدوین برنامه‌ای جامع برای مدیریت مداخلات انسانی در محدوده حریم و بستر این رودخانه، می‌بایست در زمرهٔ اولویت‌های اصلی نهادهای ذی‌ربط قرار گیرد.

* نویسندهٔ مسئول: مسعود رحیمی
Email: Masoudrahimi@um.ac.ir

مقدمه

رودخانه‌ها از اجزای اساسی اکوسیستم‌های طبیعی می‌باشند و به عنوان مهم‌ترین منابع آب سطحی به شمار می‌روند. در سراسر جهان، مناطق مجاور رودخانه‌ها همواره مکان‌های مناسبی برای توسعه کشاورزی و سکونت انسان بوده‌اند و تمدن‌های بشری نیز در امتداد رودخانه‌ها شکل گرفته و گسترش یافته‌اند (Wang, Borthwick & Ni, 2022). از قرن نوزدهم به بعد، توسعهٔ فزایندهٔ شهری تأثیر چشمگیری بر مجرای رودخانه و الگوهای کاربری زمین بر جای گذاشت، به‌گونه‌ای که تغییرات قابل توجهی در پلان‌فرم رودخانه‌ها از جمله باریک‌شدن، کانالیزه‌شدن، جابه‌جایی و پوشش بستر آن‌ها به وجود آمد (Clerici, Perego, Chelli & Tellini, 2015; Roccati et al., 2018). بررسی تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ها، از جمله تغییر در مساحت و جهت مجرا در بازه‌های زمانی مختلف، می‌تواند به جوامع مستقر در مجاورت بستر رودخانه کمک کند تا برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای و ساخت‌وساز خود را از نواحی مستعد جابه‌جایی مجرا دور نگه داشته و در نتیجه خطرات ناشی از وقوع سیلاب را به حداقل برسانند. به دلیل رشد روزافزون جمعیت و توسعه سریع زندگی شهری و روستایی در اراضی حاشیهٔ رودخانه و طبیعتاً افزایش تقاضا برای ایجاد ساخت و ساز در این اراضی، متأسفانه روند تجاوز به بستر و حریم رودخانه‌ها و نیز تصرف غیرقانونی این‌گونه اراضی به شدت افزایش‌یافته است (MPOI, 2005). در صورتی که بستر و حریم رودخانه بدون حفاظت یا برنامه‌ریزی رها شوند، در معرض تجاوزات انسانی در مناطق پرخطر آینده قرار می‌گیرند و فرصت ایجاد فضای کافی برای فرآیندهای رودخانه‌ای و بازسازی، از دست می‌رود (Fashae & Olusola, 2017). در واقع زمانی که انسان‌ها در بستر و حریم رودخانه‌ها، فعالیت‌های بدون کنترل انجام دهند، ایمنی این بخش به خطر می‌افتد. در این بین مورفولوژی مجرای رودخانه به توصیف و تعیین ویژگی‌های مساحت مقطع عرضی، شکل، الگوهای فضایی بستر و کناره‌های رودخانه اشاره دارد (Nath & Ghosh, 2022).

مورفولوژی رودخانه نقشی اساسی در پایداری مجرا، کنترل سیلاب و حفاظت اکولوژیکی ایفا می‌کند. پژوهش در زمینهٔ مورفولوژی مجرای رودخانه از جمله بررسی مساحت مجرا، تغییرات عرض رودخانه و جابه‌جایی مسیر مجرا نقش چشمگیری در کاهش اثرات منفی سیلاب‌ها، فرسایش کناره‌ها، تعیین محل مناسب سازه‌های حاشیه رودخانه و ایجاد چارچوبی پایدار برای مدیریت سیلاب دارد (Field, Tambunan & Floch, 2014). مطالعات متعددی نشان می‌دهند که فعالیت‌های انسانی و فرآیندهای طبیعی به صورت هم‌افزا، تغییراتی در مورفولوژی رودخانه‌ها ایجاد کرده‌اند (Hohensinner, Hauer & Muhar, 2018; Ibitoye, 2021). در واقع تغییرات کاربری اراضی می‌تواند از طریق دگرگونی‌های هیدرولوژی و دینامیک رسوب، مورفولوژی رودخانه و مناطق حاشیه‌ای آن را تحت تأثیر قرار دهد (Fortugno et al., 2017). لازم است از روش‌های مؤثر و اثبات شده برای پایش تغییرات مورفولوژی رودخانه استفاده شود تا زمینه‌ای برای درک و مقابله با پیامدهای احتمالی فراهم گردد. فناوری سنجش‌ازدور ابزاری بسیار مناسب برای پایش و بررسی مورفولوژی رودخانه‌هاست، زیرا از پوشش مکانی گسترده و قابلیت تکرار مشاهدات برخوردار است. دقت در شناسایی و استخراج محدوده‌های آبی، نقش مهمی در محاسبهٔ دقیق شاخص‌های مورفولوژیکی رودخانه چون طول و عرض مجرای رودخانه، میزان پایداری، شاخص سینوزیته رودخانه، نرخ جابه‌جایی جانبی، تغییرات فرسایش و رسوب‌گذاری دارد (Du et al., 2015). در سال‌های اخیر، رودخانه قره‌سو در استان اردبیل که نقشی کلیدی در تأمین منابع آب کشاورزی، تغذیه آب‌های زیرزمینی و پایداری زیست‌بوم‌های منطقه ایفا می‌کند، با چالش‌های فزاینده‌ای ناشی از تغییرات کاربری اراضی مواجه شده است. رشد جمعیت و فشار برای گسترش اراضی زراعی موجب شده تا بخش‌هایی از بستر و حریم رودخانه، بدون مجوز قانونی به باغات و زمین‌های کشاورزی تبدیل شود. تداوم این روند، پایداری طبیعی رودخانه را تهدید می‌کند. در چنین شرایطی، عدم ارزیابی و فقدان کنترل‌های نظارتی، سبب می‌شود تا مداخلات بدون درک پیامدهای بلند مدت ادامه یابند. لذا تحلیل علمی و دقیق این تغییرات با استفاده از داده‌های جغرافیایی، سنجش‌ازدور و مدل‌سازی هیدرولوژیکی، ضرورتی اساسی برای شناسایی روندهای تخریب، پیش‌بینی آینده مجرا و تدوین راهبردهای مدیریتی مؤثر در راستای توسعه پایدار و حفاظت از منابع طبیعی رودخانه قره‌سو به شمار می‌رود.

با توجه به این موضوع مطالعاتی مختلفی در داخل ایران و نیز در سطح بین‌الملل صورت‌گرفته که به صورت خلاصه به آن پرداخته می‌شود. خالقی و همکاران (Khaleghi, Roustaei, Khorshiddoust, Rezaei-Moghadam & Ghorbani, 2016)، با استفاده از مدل HEC-RAS و داده‌های میدانی، تغییرات عرض و عمق بستر رودخانه لیقوان چای را بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با وجود افزایش دبی، بخش‌هایی از پایین دست رودخانه به دلیل مداخلات انسانی مانند کانالیزه‌کردن و تغییر کاربری حریم رودخانه، دچار حفر و تنگ‌شدگی شده است. همچنین، بخش‌های بالادست رودخانه نیز تغییرات موضعی ناشی از رسوب‌گذاری را نشان می‌دهند. اسفندیاری و همکاران (Esfandiyari Darabadi, Rafiei Mahmoodjagh & Farzaneh, 2022) به بررسی تغییرات کاربری اراضی حوضهٔ آبریز زرینه‌رود و تأثیر آن بر روی فرسایش خاک با استفاده از مدل WLC[1] پرداختند. بر اساس نتایج حاصل از بررسی این محققان، تغییرات کاربری اراضی با بهره‌گیری از روش طبقه‌بندی شیءگرا نشان داد که بیشترین افزایش مساحت مربوط به کاربری‌های کشاورزی دیم و کشاورزی آبی است. همچنین آنها نشان دادند که روند تغییرات کاربری‌های بایر، مرتع غنی و متوسط، به مرور زمان به نحوی کاهشی بوده است. اصغری سراسکانرود و سعیدی ستا (Asghari Saraskanroud & Saeedi Seta, 2023) در پژوهشی به تحلیل تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر رواناب حوضهٔ قره‌چای با استفاده از مدل SWAT در استان همدان پرداختند. در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای لندست مربوط به سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۰ و روش طبقه‌بندی شیءگرا برای تهیه نقشه‌های کاربری اراضی استفاده شد. شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه با مدل SWAT و واسنجی و اعتبارسنجی آن با الگوریتم SUFI-2 در نرم‌افزار SWAT-CUP انجام گرفت. نتایج آنها نشان داد افزایش اراضی کشاورزی موجب افزایش رواناب در حوضهٔ قره‌چای شده است. بعاج‌زاده و همکاران (Baajzadeh, Shah-Hosseini & Shayan, 2025) ضمن تحلیل فعالیت‌های انسانی و نئوتکتونیک، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مشاهدات میدانی، تغییرات مورفولوژیک رودخانه شور و دشت اشتهارد را بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که عوامل آنتروپوژنیک از قبیل تغییر کاربری اراضی، استخراج معادن، جاده‌سازی بیشترین تأثیر را بر تغییر ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی رودخانه داشته است. الطائی و همکاران (Al-Taei, Alesheikh & Darvishi Boloorani, 2023) در پژوهشی تغییرات کاربری در حوضه رودخانه‌های دجله و فرات را طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ با الگوریتم جنگل تصادفی در محیط Google Earth Engine بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد مدل از دقت بالایی برخوردار است و شاخص‌های طیفی بیشترین نقش را در تفکیک کاربری‌ها دارند. بر اساس نظر این پژوهشگران، مناطق شرق و جنوب شرق عراق و شرق سوریه بیشترین شدت تغییرات کاربری و نیز خطر فرسایش را داشته است. لیو و همکاران (Liu, Wu, Xu, Mu & Zhang, 2024) در پژوهشی به مدل‌سازی اثرات تغییرات کاربری و پوشش اراضی بر رواناب رودخانه با استفاده از مدل SWAT در منطقهٔ سرچشمه رودخانهٔ دان‌جیانگ[2] چین پرداختند. نتایج آنها نشان داد اراضی زراعی کاهش و اراضی جنگلی، مرتعی و شهری افزایش یافته‌اند. افزایش اراضی شهری و کشاورزی موجب افزایش رواناب و گسترش جنگل‌ها سبب کاهش آن شده است. این پژوهش مبنایی علمی برای مدیریت بهینهٔ منابع آب و برنامه‌ریزی کاربری اراضی منطقه فراهم کرده است.

نونز و همکاران (Nones, Guerrero, Schippa & Cavalieri, 2024) در پژوهشی به بررسی تأثیر تغییرات انسانی و اقلیمی بر مورفولوژی مجرا و پوشش گیاهی رودخانهٔ پو[3] ایتالیا با استفاده از تصاویر Landsat پرداختند. نتایج تحقیق این پژوهشگران نشان داد که پوشش‌گیاهی بر روی کناره‌های رودخانه افزایش داشته و پویایی مجرا کاهش یافته است. این مطالعه نشان می‌دهد دوره‌های خشک طولانی می‌توانند توسعه گیاهان روی کناره‌های رودخانه‌های معتدل را تقویت کنند.

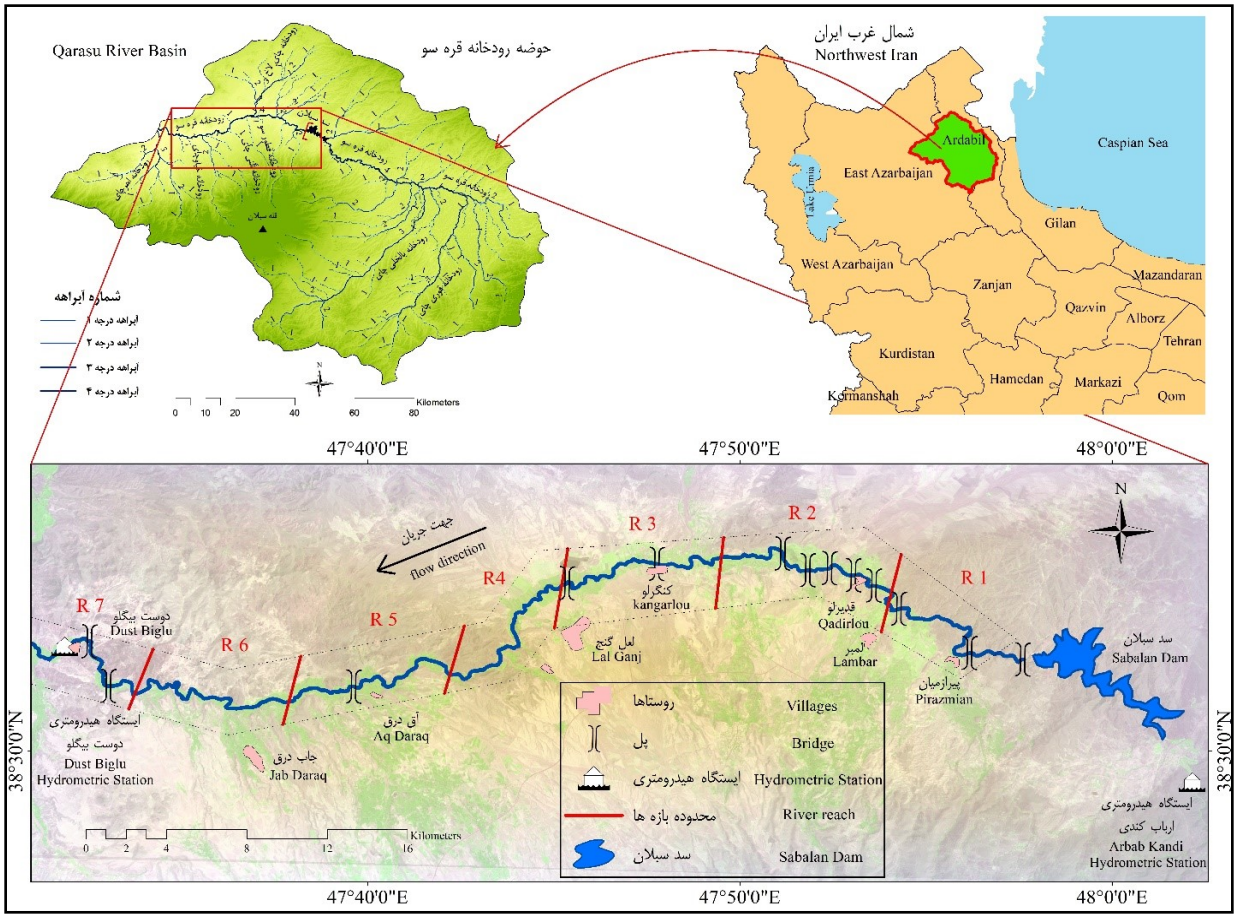
1- Weighted Linear Combination
2- Danjiang
3- Po River

رودز و همکاران (Rhodes, Talchabhadel & Jordan, 2024) در پژوهشی به بررسی تغییرات مورفولوژی کانال و کاربری اراضی طی سال‌های ۱۹۷۲ تا ۲۰۲۰ در حوضهٔ رودخانهٔ ناواسوتا[1]، تگزاس پرداختند. نتایج تحقیق این پژوهشگران نشان داد در طی بازهٔ مورد مطالعه، طول رودخانه ۴/۳ کیلومتر کوتاه شده و تعداد کانال‌های فرعی نیز کاهش یافته است. همچنین نتایج آنها نشان داد که سطح پوشش غیرقابل نفوذ ۳۹/۲ درصد افزایش و پوشش گیاهی علفی ۱۲/۵ درصد کاهش یافته است. این تغییرات همراه با افزایش بارش، موجب افزایش رواناب و تشدید مشکلات سیلاب در حوضه شده‌اند. چین و همکاران (Qin, Jin, Du & Jin, 2024) در پژوهشی به بررسی تغییرات مورفولوژیکی و تأثیر عوامل طبیعی و انسانی در رودخانهٔ زرد[2] طی ۲۵ سال گذشته پرداختند. این پژوهشگران با استفاده از تصاویر لندست اصلاح شده و شاخص AWEI در محیط Google Earth Engine، پارامترهای مورفولوژیکی مانند عرض کانال، طول مرکز کانال و نرخ مهاجرت جانبی محاسبه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد عوامل طبیعی و توسعه نیروگاه‌های آبی بیشترین تأثیر را بر مورفولوژی رودخانه داشته‌اند. پژوهش حاضر در راستای تقویت درک علمی از روابط پیچیده میان تغییرات کاربری اراضی و پویایی‌های مورفولوژیک رودخانه‌ها طراحی و اجرا شده است. مطالعات نشان می‌دهد که مجرای رودخانه قره‌سو در طی ۱۹ سال اخیر متأثر از تغییرات گسترده کاربری اراضی و دخل و تصرف‌های انسانی (عموماً توسعه فعالیت‌های کشاورزی) در محدودهٔ بستر و حریم آن، دچار تخریب و تغییرات مورفولوژیکی چشمگیری گردیده است. این تغییرات صورت گرفته، عمدتاً به صورت کاهش عرض رودخانه و تنگ‌شدگی مجرا نمایان شده که نتیجه آن کاهش ظرفیت انتقال جریان آب و تشدید پدیده کانالیزه شدن مجرای رودخانه می‌باشد. بر این اساس این روند در آینده می‌تواند مخاطرات سیلابی را برای اراضی کشاورزی حاشیه رودخانه به طور قابل توجهی افزایش دهد. از این رو، بررسی نقش دقیق مداخلات آنتروپوژنیک به عنوان عامل محرک این تغییرات صورت گرفته در مورفولوژی رودخانهٔ قره‌سو، امری ضروری به نظر می‌رسد.

منطقهٔ مورد مطالعه

رودخانهٔ قره‌سو یکی از رودخانه‌های دائمی استان اردبیل می‌باشد که از دامنه‌های شمالی کوه سبلان سرچشمه گرفته و پس از اتصال رودخانه اهرچای به‌عنوان رودخانه دره رود شناخته‌شده و در نزدیکی شهرستان اصلاندوز به رودخانه ارس ملحق می‌شود. منطقهٔ مورد مطالعه در بین عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه و ۵۶ ثانیه تا ۳۸ درجه و ۳۵ دقیقه و ۳۴ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۳۱ دقیقه و ۲۱ ثانیه تا ۴۷ درجه و ۵۵ دقیقه و ۴۸ ثانیه شرقی واقع شده است. از رودخانه‌های مهمی که قبل از پیوستن اهرچای به رودخانهٔ قره‌سو می‌ریزند می‌توان به رودخانه‌های بالیقلوچای و خیاوچای اشاره کرد. منطقهٔ مورد مطالعه در این پژوهش، بازه‌ای از این رودخانه است که از پایین دست سد سبلان شروع شده و در تلاقی رودخانه اهرچای به پایان می‌رسد. طول تقریبی رودخانه در این بازهٔ ۷۵ کیلومتر می‌باشد. ازجمله روستاهای استقرار یافته در حاشیه این رودخانه می‌توان به روستاهای پیرازمیان، لمبر، قدیرلو، کنگرلو، قاراداش، لعل گنج، آق درق، جبدرق و روستای دوست بیگلو اشاره کرد (شکل۱).

1- Navasota River
2- Yellow River



شکل ۱- موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه در شمال غرب کشور (استان اردبیل)

Fig.1. Location of the study area in northwestern Iran (Ardabil Province)

مواد و روش‌ها

یکی از اساسی‌ترین مراحل انجام هر پژوهش علمی، جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات پایه است. در این پژوهش، به منظور تحلیل ویژگی‌های مورفولوژیکی و هیدرولوژیکی رودخانه قره‌سو، از داده‌ها و منابع متنوعی استفاده شده است. نقشه‌های توپوگرافی بزرگ مقیاس رودخانهٔ قره‌سو با مقیاس ۱:۲۰۰۰ (شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل) برای استخراج توپوگرافی دقیق بستر و پهنهٔ سیلابی رودخانه به‌کار گرفته شد. همچنین، از نقشه‌های زمین‌شناسی مشکین‌شهر و اردبیل با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (سازمان زمین‌شناسی کشور) جهت شناسایی واحدهای لیتولوژیکی و ساختاری منطقه استفاده گردید. علاوه بر این، داده‌های ارتفاعی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای ALOS – PALSAR با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر به منظور تولید مدل رقومی ارتفاع (DEM) و تحلیل توپوگرافی عمومی محدودهٔ مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفت.

در ادامه، جهت تحلیل تغییرات کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه، از تصاویر ماهواره‌ای شامل: تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر (سازمان فضایی اروپا -ESA) مربوط به سال ۲۰۲۴ و همچنین تصاویر سنجنده‌های TM و ETM^+ ماهواره‌ی Landsat با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر (سازمان زمین‌شناسی امریکا-USGS) مربوط به سال ۲۰۰۵، استفاده شد. همچنین از تصاویر ماهواره‌ای IRS با قدرت تفکیک مکانی ۲/۵ و ۵ متر (سازمان جغرافیای نیروهای مسلح) به منظور استخراج مجرای رودخانه برای سال ۲۰۰۵ بهره‌گرفته شد. سایر داده‌ها، شامل داده‌های هیدرولوژیکی (داده حداکثر دبی روزانه‌ای، داده‌های

دبی اشل و داده‌های رسوب) از شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل اخذ شده و در کنار مطالعات میدانی مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش از مجموعه‌ای از نرم‌افزارها و ابزارهای مختلف استفاده شده است. نرم‌افزارهای ArcGIS و ENVI برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای، تهیهٔ نقشه‌های کاربری اراضی و تحلیل‌های مکانی مورد استفاده قرار گرفتند. نرم‌افزار Sas Planet و Google Earth نیز به منظور مشاهده تغییرات بصری در بازه‌های زمانی مختلف و بررسی دقیق‌تر مناطق مورد مطالعه به کار گرفته شدند. برای تحلیل‌های هیدرولوژیکی و ارتباط بین الگوهای کاربری اراضی و رفتار رودخانه، از نرم‌افزار HEC-RAS و الحاقی‌های HEC-GeoRAS و Arc Hydro استفاده شد. به علاوه افزونه Planform Statistics برای بررسی تغییرات شکل و مسیر رودخانه به کار رفت.

استخراج کاربری اراضی

در این پژوهش جهت استخراج لایه کاربری اراضی محدودهٔ مورد مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای Landsat و Sentinel-2 برای سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۴ استفاده شد. در ابتدا تصاویر ماهواره‌ای Landsat تحت تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری قرار گرفتند. ابتدا مقادیر DN به رادیانس با استفاده از پارامترهای کالیبراسیون متادیتا تبدیل شد. سپس تصحیح اتمسفری FLAASH انجام شد که طول موج‌های مرئی تا مادون قرمز نزدیک و کوتاه را تصحیح می‌کند (Module, 2009). FLAASH از یک معادله استاندارد برای رادیانس طیفی در یک پیکسل سنجنده، L، شروع می‌شود که به دامنه طول موج خوشیدی و مواد صاف، لامبرتی یا معادل آنها اعمال می‌شود. این معادله به صورت زیر است (رابطه ۱).

$$L = \left(\frac{A\rho}{1-\rho_e S}\right) + \left(\frac{B\rho_e}{1-\rho_e S}\right) + L_a \qquad (۱)$$

که در آن: ρ بازتاب سطح پیکسل، ρe متوسط بازتاب سطح پیکسل و پیرامون آن، S البدوی کروی اتمسفر، La پخش برگشتی رادیانس توسط اتمسفر، A و B ضرایبی هستند که وابسته به شرایط اتمسفری و ژئومتریک می‌باشند. در ادامه، با استفاده از طبقه‌بندی هیبریدی، تصاویر سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۴ به پنج کلاس کاربری تفکیک شدند. پس از انتخاب نمونه‌های تعلیمی، طبقه‌بندی نظارت شده با الگوریتم حداکثر احتمال[1] اجرا شد و صحت آن ارزیابی گردید. همچنین، برای استخراج مجرای رودخانه نیز، شاخص آب (WI) از رابطه (۲) مورد استفاده قرار گرفت.

$$WI = \frac{B_1+B_2+B_3}{B_4+B_5+B_7} \qquad (۲)$$

در این رابطه Bi باند شماره i از تصویر +ETM می‌باشد. در آخر، دقت طبقه‌بندی تصاویر سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۴ با نمونه‌گیری میدانی و بررسی پیکسل‌ها، ارزیابی شد. دقت کلی برای سال ۲۰۲۴ حدود ۹۳/۱ درصد و برای سال ۲۰۰۵ حدود ۹۱/۲ درصد به دست آمد. ضریب کاپا نیز برای سال ۲۰۲۴ برابر ۰/۸۸ و برای سال ۲۰۰۵ برابر ۰/۸۵ بود که نشان دهندهٔ دقت بالاتر طبقه‌بندی سال ۲۰۲۴ است (شکل ۲).

مورفومتری رودخانه

تغییرات جانبی[2] و پایداری جانبی[3] مجرای رودخانه از مهم‌ترین شاخص‌هایی می‌باشند که در مطالعات ژئومورفولوژی رودخانه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند. تغییرات جانبی به وسیلهٔ اندازه‌گیری تغییرات در بیرونی‌ترین خط کناری مجرا قابل محاسبه می‌باشد. شاخص پایداری مجرا نیز بر اساس محاسبهٔ مقدار مساحت مجرای فعال تغییریافته و همچنین مقدار مساحت مجرای فعال تغییر نیافته در طول بازهٔ زمانی مورد بررسی، قابل اندازه‌گیری می‌باشد (Richard, 2001).

1- Maximum Likelihood Classification
2- Lateral Mobility (Movement)
3- Lateral Stability

تغییرات جانبی مجرا به دو بخش اصلی تغییرات در عرض رودخانه و مهاجرت مجرا تقسیم می‌گردد. برای محاسبه تغییرات عرض رودخانه می‌توان از شاخص تغییرات جانبی مجرا[1]، رابطه (۳) استفاده کرد. در واقع این شاخص به وسیلهٔ اندازه‌گیری تغییرات در بیرونی‌ترین خط کناره‌های مجرای رودخانه قابل محاسبه می‌باشد (Richard., 2005):

$$\text{Lateral Mobility Index} = \frac{\text{Change Active Channel Area}}{\text{Previous Active Channel Area}} * 100 \quad (۳)$$

در این رابطه، ارزش نزدیک به ۱۰۰ ٪ نشان‌دهندهٔ بیشترین تغییرات عرضی رودخانه و ارزش کم این شاخص، تغییرات عرضی پایین رودخانه را نشان می‌دهد. همچنین برای محاسبه آهنگ مهاجرت مجرا می‌توان از روشی که توسط شیلدز و همکاران (Shields, Simon & Steffen, 2000) ارائه شده، استفاده کرد. این روش با استفاده از رابطه (۴) قابل محاسبه می‌باشد (Giardino & Lee, 2011; Shields et al., 2000):

$$Rm = (A / L) / y \quad (۴)$$

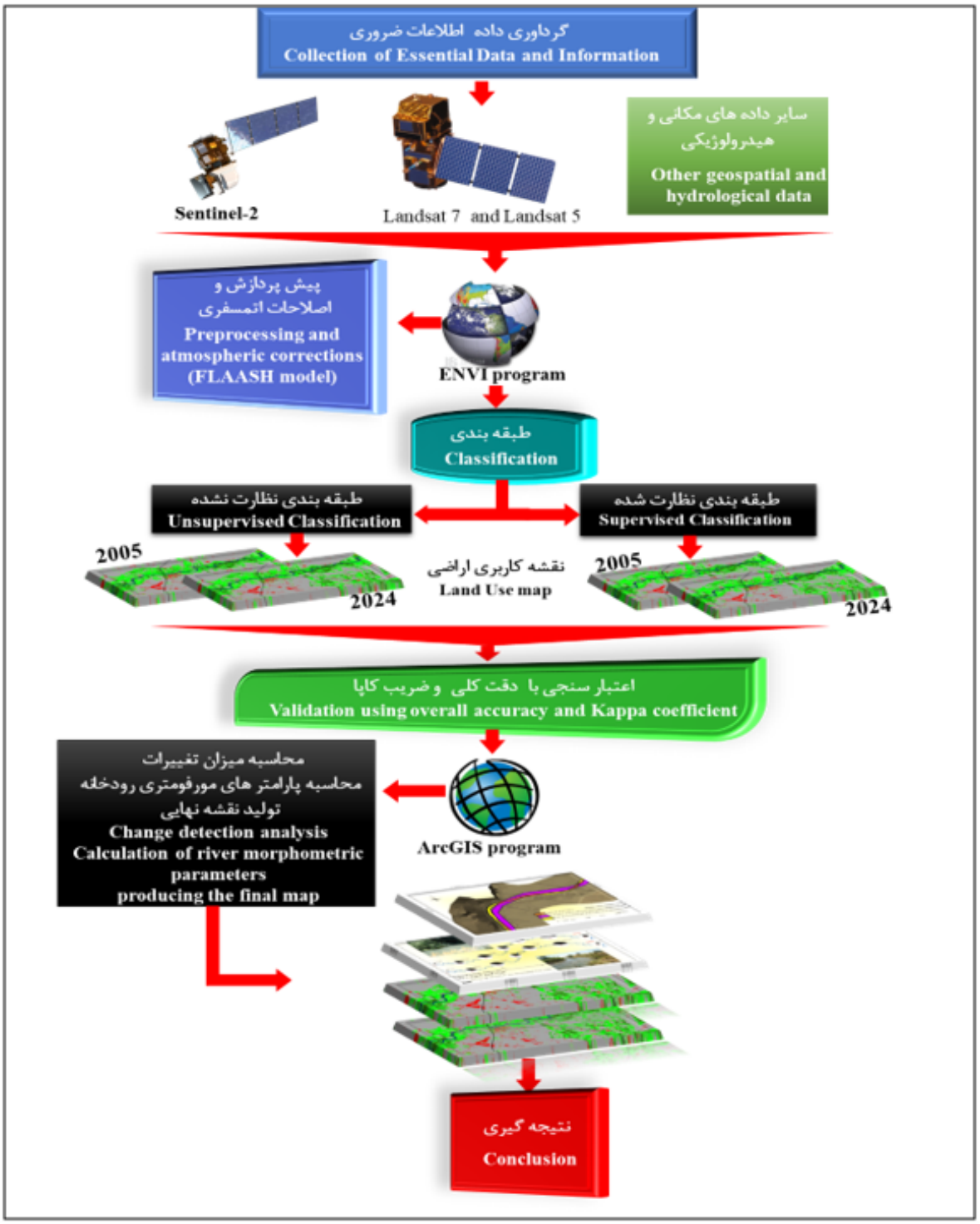
که در آن: Rm آهنگ مهاجرت؛ A مساحت موجود بین دو خط مرکزی مجرا؛ L طول خط مرکزی مجرا در زمان t1؛ و y تعداد سال می‌باشد. در این زمینه، برای افزایش دقت کار در رابطه با محاسبه خط مرکزی مجرا و سایر محاسبات از افزونه[2] Planform Statistics کمک گرفته شد.

شاخص پایداری جانبی مجرا[3] نیز بر اساس تغییر در مجرای فعال بدون پوشش گیاهی رودخانه در طول بازهٔ زمانی مورد مطالعه، بر اساس رابطه (۵) محاسبه می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر شاخص پایداری جانبی، از طریق تقسیم مساحت مجرای فعال تغییر نیافته[4] به مساحت مجرای فعال پیشین[5] قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

$$\text{Lateral Stability Index} = \frac{\text{Unchange Active Channel Area}}{\text{Previos Active Channel Area}} \quad (۵)$$

عدد خروجی این شاخص هر چقدر به واحد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهندهٔ عدم تغییر و هر چقدر به واحد صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهندهٔ تغییر در بازهٔ زمانی مورد مطالعه می‌باشد. هر یک از این شاخص‌های اشاره شده در بالا اطلاعات زیادی را دربارهٔ چگونگی تغییرات و پایداری جانبی مجرای رودخانه در اختیار قرار می‌دهد که به‌راحتی به‌وسیله تکنیک‌های GIS با دقت بالا قابل‌اندازه‌گیری می‌باشند.

1 - Lateral Mobility Index
2- Add In
3 - Lateral Stability Index
4 - Unchanged Active Channel Area
5 - Previous Active Channel Area

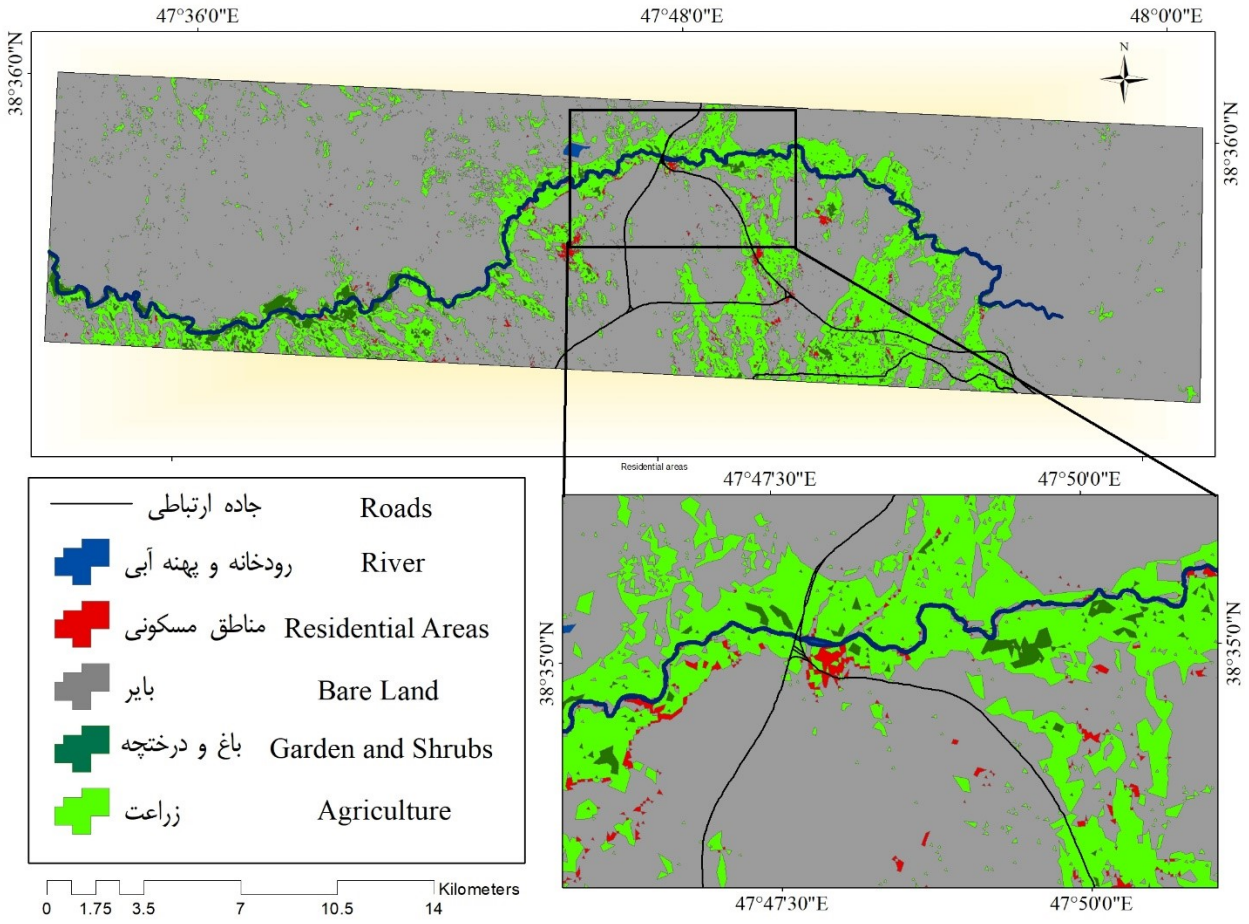


شکل ۲- فلوچارت مراحل انجام تحقیق

Fig.2. Flowchart of Research Steps

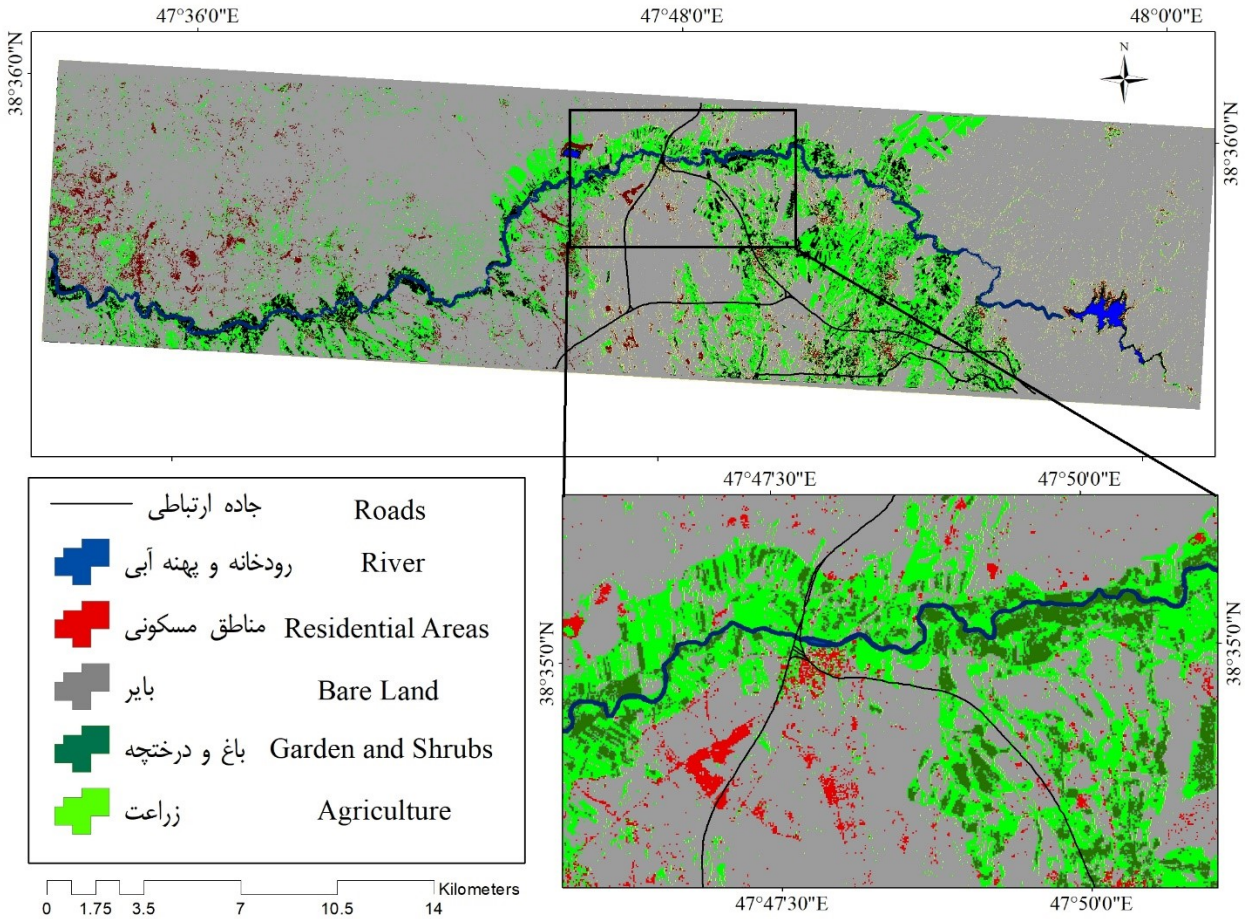
نتایج و بحث

تعداد طبقات کاربری اراضی در منطقهٔ مورد مطالعه هم برای سال ۲۰۰۵ و هم برای سال ۲۰۲۴ به ۵ طبقهٔ کاربری رودخانه و پهنه‌های آبی، کاربری مناطق مسکونی، کاربری بایر، کاربری باغ و درختچه و کاربری زراعت کلاس‌بندی شد. بررسی تغییرات پوشش کاربری اراضی در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ حاکی از آن است که در این فاصله زمانی مساحت هر چهار کاربری زراعت، کاربری باغ و درختچه، کاربری مسکونی، کاربری رودخانه و پهنه‌های آبی افزایش یافته و به تبع آن از مساحت کاربری بایر در منطقه کاسته شده است (شکل‌های ۳ و ۴). بررسی تغییرات کاربری کشاورزی در محدودهٔ هفت بازهٔ انتخابی نیز نشان داد که در بازهٔ اول نزدیک ۱۱۶ هکتار، در بازهٔ دوم ۲۵۱ هکتار، در بازهٔ سوم ۲۰۲ هکتار، در بازهٔ چهارم ۴۹ هکتار، در بازهٔ پنجم ۲۷ هکتار و در بازهٔ هفتم ۲۶ هکتار بر وسعت کاربری کشاورزی در منطقه دشت سیلابی رودخانه قره‌سو افزوده شده و همچین نزدیک ۳۶ هکتار در بازهٔ ششم از وسعت کاربری کشاورزی در محدوده دشت سیلابی رودخانه قره‌سو کاسته شده است.



شکل ۳- نقشهٔ کاربری اراضی دشت سیلابی رودخانهٔ قره‌سو برای سال ۲۰۰۵

Fig.3. Land use map of the Qara-Su River floodplain for the year 2005



شکل۴- نقشهٔ کاربری اراضی دشت سیلابی رودخانهٔ قره‌سو برای سال ۲۰۲۴

Fig.4. Land-use map of the Qara-Su River floodplain for the year 2024

همچنین محاسبه درصد کاربری کشاورزی برای سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۴ نشان داد که درصد کاربری کشاورزی در بازهٔ اول از ۱۷ درصد به ۳۷ درصد، در بازهٔ دوم از ۳۴ درصد به ۵۲ درصد، در بازهٔ سوم از ۳۳ درصد به ۵۳ درصد، در بازهٔ چهارم از ۳۵ درصد به ۴۹ درصد و در بازهٔ پنجم از ۳۷ درصد به ۳۹ درصد افزایش‌یافته است. همچنین نتایج نشان داد که درصد کاربری کشاورزی در بازهٔ ششم از ۳۱ درصد در سال ۲۰۰۵ به ۲۳ درصد در سال ۲۰۲۴ کاهش یافته و نیز در بازهٔ هفتم کاربری کشاورزی از ۶/۵ درصد در سال ۲۰۰۵ به ۴/۵ درصد در سال ۲۰۲۴ کاسته شده است (جدول۱).

بر اساس نتایج جدول ۱ بیش‌ترین میزان افزایش کاربری کشاورزی در محدودهٔ دشت سیلابی رودخانهٔ قره‌سو در طی ۱۹ سال اخیر مربوط به بازهٔ اول و دوم بوده است. به بیان دیگر، بازهٔ اول با ۱۱۶ هکتار و بازهٔ دوم با ۲۵۱ هکتار افزایش در کاربری کشاورزی بیشترین تغییر در کاربری کشاورزی داشته‌اند. همچنین بر اساس این جدول می‌توان نتیجه گرفت که میزان تغییرات در کاربری کشاورزی در چهار بازهٔ اول، دوم، سوم و هفتم بسیار بیشتر از بازه‌های دیگر رودخانه بوده است. بر این اساس می‌توان گفت که میزان دخل و تصرف کشاورزان در این چهار بازه بیشتر از بازه‌های دیگر بوده و تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر مورفولوژی مجرای رودخانه قره‌سو به‌صورت تنگ‌شدگی مجرا در این بازه‌های ذکر شده، بیشتر از سایر بازه‌ها بوده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، بر اساس شکل‌های ۳ و ۴ بیشترین میزان کاربری کشاورزی، هم در سال ۲۰۰۵ و هم در سال ۲۰۲۴ مربوط به محدوده سه بازهٔ دوم ، سوم و پنجم می‌باشد. همچنین بازهٔ اول و هفتم نیز کمترین میزان کاربری کشاورزی را در طی سال‌های مذکور دارا می‌باشند.

جدول ۱- تغییرات کاربری کشاورزی محدوده دشت سیلابی در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ (مساحت به هکتار)

Table 1- Agricultural land-use change in the floodplain area from 2005 to 2024 (ha)

بازه‌های موردمطالعه Study reaches	مساحت کاربری کشاورزی سال ۲۰۰۵ Agricultural land area in 2005 (ha)	مساحت کاربری کشاورزی سال ۲۰۲۴ Agricultural land area in 2024(ha)	میزان اختلاف (به هکتار) Difference(ha)	درصد تغییرات (به درصد) Percentage change (%)	درصد[1] کاربری در سال ۲۰۰۵ Percentage of land-use in 2005 (%)	درصد کاربری در سال ۲۰۲۴ Percentage of land-use in 2024 (%)
بازهٔ اول First reach	287.6	404.54	116.94	40.66%	17.07%	37.01%
بازهٔ دوم Second reach	877.73	1129.68	251.95	28.70%	34.49%	52.39%
بازهٔ سوم Third reach	778.09	980.96	202.87	26.07%	33.49%	53.03%
بازهٔ چهارم Fourth reach	598.28	642.66	49.38	8.25%	35.01%	49.57%
بازهٔ پنجم Fifth reach	768.97	796.63	27.66	3.60%	37.27%	39.97%
بازهٔ ششم Sixth reach	616.57	579.29	-36.78	-5.96%	31.47%	23.57%
بازهٔ هفتم Seventh reach	127.48	154.05	26.57	20.84%	6.52%	4.54%

تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر دشت سیلابی

تغییرات کاربری اراضی برای منطقه رودکنار[2] و دشت سیلابی رودخانه قره‌سو از طریق مقایسه تصاویر ماهواره‌ای Landsat و Sentinel-2 برای سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی تغییرات کاربری اراضی در طی ۱۹ سال گذشته یک روند افزایشی در تراکم کاربری زراعت و باغ و درختچه را در منطقهٔ رودکنار و دشت سیلابی رودخانهٔ قره‌سو نشان می‌دهد (شکل۶). به علت احداث سد سبلان و به تبع آن کاهش دبی و دینامیک جانبی مجرا، کاربری اراضی پایین دست سد دچار تغییرات بسیار زیادی شده است. ورود کشاورزان به بستر و حریم رودخانه و دخل و تصرف صورت گرفته در طول مسیر رودخانه قره‌سو، سبب تثبیت کنارهٔ رودخانه به دلیل فعالیت‌های کشاورزی چون زارعت و باغداری شده است (شکل۵). در بازه‌های دوم و سوم علی‌رغم افزایش قابل توجه پهنه‌های سیل‌گیر رودخانه، پوشش گیاهی متراکم دشت سیلابی امکان رخداد تغییر مجرا به صورت مهاجرت رودخانه[3] را به حداقل ممکن کاهش داده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد، دست‌اندازی به بستر و حریم رودخانه قره‌سو، علاوه بر مشکلات و تنش‌های اجتماعی ناشی از آن، به دلیل کاستن عرض مجرا، سبب کاهش ظرفیت انتقالی جریانات سیلابی برای سیلاب‌های با دورهٔ بازگشت بیش از ۱۰ سال شده است. با توجه به بازدیدهای میدانی صورت گرفته، دخل و تصرفات حتی به داخل مجرای اصلی رودخانه نیز رسیده و تلاش برای افزایش سطح زمین‌های کشاورزی، به بهای کاهش عرض مجرای رودخانه بوده و این به معنی افزایش ریسک خطرات ناشی از سیلاب‌های بزرگ می‌باشد (شکل۵). به بیانی دیگر انجام فعالیت‌های کشاورزی در اطراف رودخانه قره‌سو و دست‌اندازی در بستر و حریم رودخانه و به تبع آن کانالیزه کردن مجرای رودخانه، منجر به تنگ‌تر شدن مجرای رودخانه و تسریع در آب‌گرفتگی زمین‌های مجاور در هنگام وقوع سیلاب می‌شود.

۱- درصد این مساحت نسبت به مساحت داخل ترانسکت هر بازه که برای هر دو بازهٔ زمانی یکسان می‌باشد، محاسبه شده است.

2- Riparian

3- Channel Migration



شکل۵- فعالیت‌های کشاورزی در محدوده بستر و حریم رودخانهٔ قره‌سو (بازهٔ دوم)

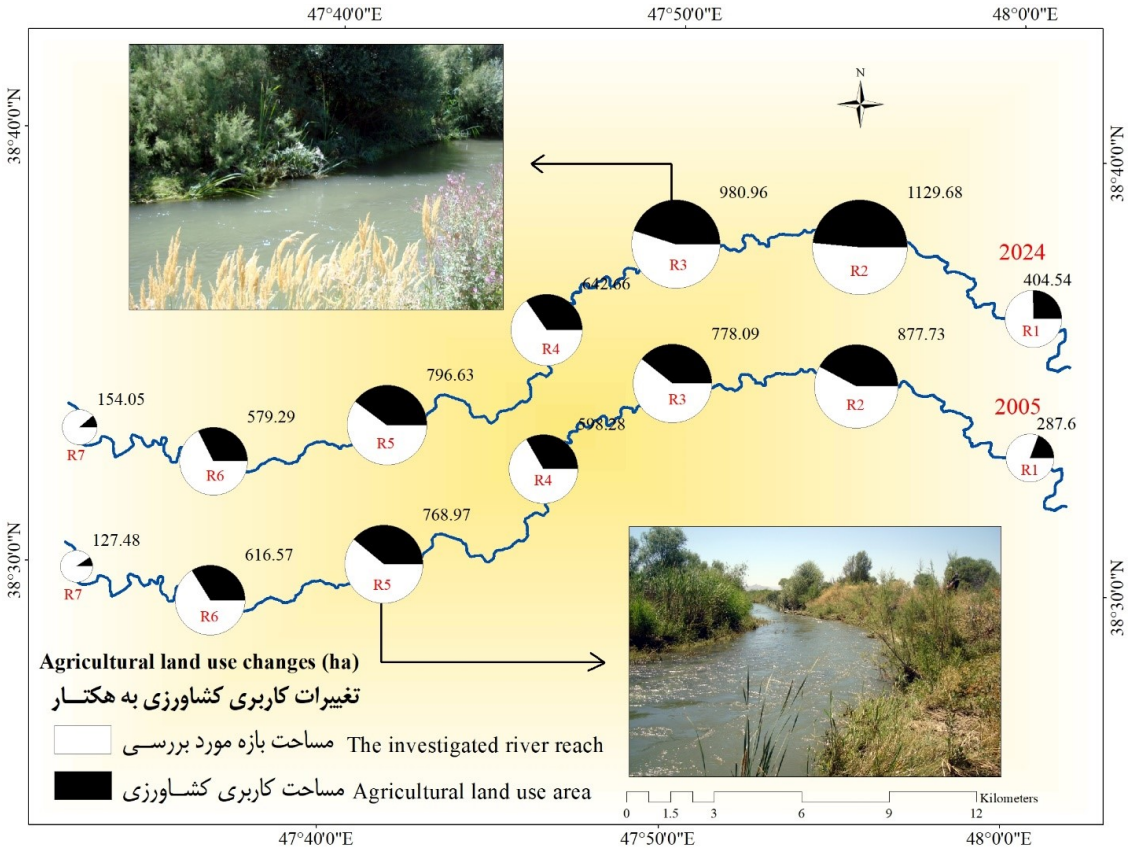
Fig.5. Agricultural activities within the bed and riparian zone of the Qara-Su River (second reach)

مورفومتری مجرای رودخانهٔ قره‌سو

برای بررسی دینامیک عرضی مجرای رودخانهٔ قره‌سو از چندین شاخص کمّی در قالب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شد. در رابطه با جابه‌جایی جانبی مجرای رودخانه‌ها، مخصوصاً نرخ مهاجرت جانبی مجرا، روش‌ها و شاخص‌های مختلفی با مبنای محاسباتی متفاوت وجود دارد. برخی از محاسبات بر مبنای ترسیم ترانسکت‌هایی عمود بر مسیر رودخانه می‌باشد. روش ترانسکت، شامل ترسیم یک سری از ترانسکت‌های عمود بر دشت سیلابی رودخانه و اندازه‌گیری فاصله بین نقاط متقاطع بین خط مرکزی مجرا و ترانسکت برای چهارچوب دوره‌های زمانی بعدی می‌باشد (Giardino & Lee, 2011). هر ترانسکت از طریق خطوطی تحت عنوان خطوط فرسایش- رسوب‌گذاری[1] به چندین بخش تفکیک می‌شود. این ترانسکت‌ها و خطوط برای تمامی دوره‌های زمانی ثابت باقی می‌ماند و تغییرات مجرا نسبت به آن‌ها به صورت کمّی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. آهنگ حرکت جانبی مجرای رودخانه از طریق اندازه‌گیری حرکت کناره‌های چپ و راست مجرا در طول خطوط انباشت/کاوش در طی دورهٔ زمانی مطالعاتی محاسبه شد. هر معیار یا سنجه حرکت جانبی، ویژگی‌های مختلفی از نحوه حرکت مجرا را آشکار می‌سازند.

1- Aggradation/Degradation

دو سنجه متفاوت عرض مجرا شامل عرض مجرای فعال و عرض مجرای کل می‌باشد. عرض مجرای فعال، پشته‌ها یا جزایر داخل مجرا را شامل نمی‌شود و به‌عنوان معرف مجرای شکل‌گرفته توسط رژیم غالب رسوب و آب در نظر گرفته می‌شود. عرض مجرای کل، پشته‌ها و جزایر داخل مجرا را شامل می‌شود.



شکل۶- تغییرات کاربری کشاورزی در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ محدودهٔ دشت سیلابی رودخانهٔ قره‌سو

Fig.6. Changes in agricultural land-use from 2005 to 2024 in the floodplain area of the Qara-Su River

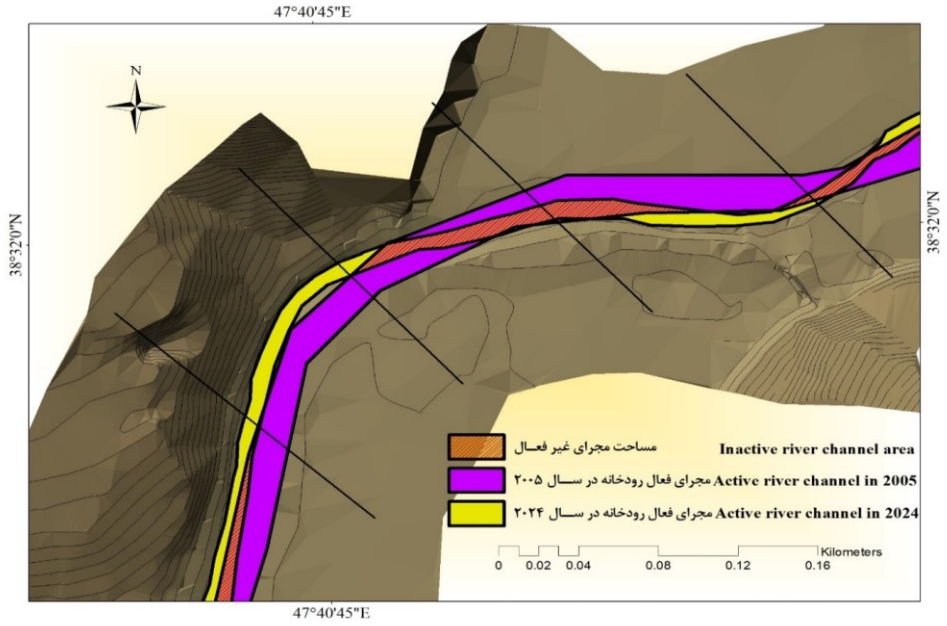
برای یک مجرای تک شاخه (تک‌مجرا) همچون بیشتر قسمت‌های رودخانه قره‌سو، عرض مجرای فعال و عرض مجرای کل برابر می‌باشند. در تئوری، تغییرات در عرض مجرای فعال می‌تواند نشان‌دهندهٔ پاسخ به رژیم محرک رسوب، آب و یک حرکت به‌سوی یک عرض تعادل باشد. تغییرات در عرض مجرای کل همچنین در پاسخ به رژیم رسوب و آب هستند، اما آن‌ها می‌توانند شامل تنظیمات پلانفرم به شکل تغییرات در اندازهٔ پشته‌ها یا جزایر وسط مجرا باشند. مقدار مهاجرت رودخانه با افزایش جریان انرژی، سینوزیته و عرض کلی مجرا (شامل پشته‌های تثبیت‌شده با پوشش گیاهی) افزایش می‌یابد. نتایج بررسی میزان آهنگ مهاجرت بر اساس رابطه (۴) برای بازه‌های انتخابی رودخانه قره‌سو نشان داد که در طول ۱۹ سال اخیر در بازهٔ اول، میزان آهنگ مهاجرت رودخانه ۰/۲۹ متر در سال، بازهٔ دوم ۰/۴۱ متر در سال، بازهٔ سوم ۰/۴۸ متر در سال، بازهٔ چهارم ۰/۴۳متر در سال، بازهٔ پنجم ۰/۵۲ متر در سال، بازهٔ ششم ۰/۴۹ متر در سال و برای بازهٔ هفتم ۰/۵۱ متر در سال بوده است. میانگین آهنگ مهاجرت کل بازه‌ها نیز ۰/۴۴ متر در سال محاسبه گردید. همچنین محاسبات نشان داد که در سال ۲۰۰۵ مقدار مساحت رودخانه قره‌سو ۸۰/۰۴ هکتار بوده که در سال ۲۰۲۴ مقدار مساحت رودخانه به ۲۶/۰۲ هکتار کاهش پیداکرده است که این مطلب نیز نشان‌دهنده تغییرات در عرض مجرای رودخانه بوده که عمدتاً در جهت کاهش عرض و تنگ‌شدگی مجرا اتفاق افتاده است.

شاخص پایداری جانبی[1] با اندازه‌گیری مقدار مساحت مجرای فعال تغییرنیافته[2] و نیز مقدار مساحت مجرای فعال قبلی[3] قابل محاسبه می‌باشد (Richard, 2001). مقدار نزدیک به عدد ۱ شاخص پایداری جانبی نشان می‌دهد که مجرا تحرکی نداشته و نسبتاً پایدار بوده و نیز مقدار کوچک‌تر این شاخص نشان‌دهندهٔ تغییر موقعیت مجرای فعال رودخانه می‌باشد. بر اساس رابطه (۵)، میزان پایداری جانبی بازه‌های انتخابی رودخانهٔ قره‌سو نیز محاسبه گردید. نتایج محاسبات نشان داد که میزان شاخص پایداری جانبی برای بازهٔ اول عدد ۰/۳۲، بازهٔ دوم ۰/۳۱، بازهٔ سوم ۰/۲، بازهٔ چهارم ۰/۲۱، بازهٔ پنجم ۰/۱۷، بازهٔ ششم ۰/۱۶ و برای بازهٔ هفتم عدد ۰/۱۷ می‌باشد. همچنین میانگین شاخص پایداری جانبی کل مجرای رودخانه قره‌سو نیز عدد ۰/۲۲ محاسبه گردید. مقدار پایین شاخص پایداری بازه‌های مختلف رودخانهٔ قره‌سو با توجه به آهنگ مهاجرت پایین آن نشان‌دهندهٔ میزان پایین مساحت مجرای فعال تغییر نیافته در طول دوره مورد بررسی می‌باشد که علت آن نیز تنگ‌شدگی مجرای رودخانهٔ قره‌سو بوده است (شکل۷).

همچنین با اندازه‌گیری مقدار مساحت مجرای فعال تغییریافته[4] و نیز مقدار مجرای فعال قبلی می‌توان به شاخص مهم دیگری به نام شاخص تغییرات جانبی[5] دست‌یافت. در واقع این شاخص به‌وسیله اندازه‌گیری تغییرات در بیرونی‌ترین خط کناره‌های مجرای رودخانه قابل‌محاسبه می‌باشد (Richard, 2005). بر اساس این شاخص، ارزش نزدیک به ۱۰۰٪ نشان‌دهندهٔ بیشترین تغییرات عرضی رودخانه و ارزش کم این شاخص تغییرات عرضی پایین رودخانه را نشان می‌دهد. نتایج محاسبات این شاخص، بر اساس رابطه (۳) برای بازه‌های انتخابی نشان داد که شاخص تغییرات جانبی مجرای رودخانه در بازهٔ اول ۷۱٪، در بازهٔ دوم ۷۹٪، در بازهٔ سوم ۸۳٪، در بازهٔ چهارم ۸۱٪، در بازهٔ پنجم ۸۴٪، در بازهٔ ششم ۸۵٪ و در بازهٔ هفتم ۸۴٪ بوده است. نتایج این شاخص با نتایج شاخص پایداری جانبی رودخانه کاملاً مطابقت دارد. باید افزود مقدار نسبتاً بالای این شاخص حتی در بازه‌هایی که کنترل زمین‌شناسی وجود دارد با کاهش عرض رودخانه (تنگ‌شدگی مجرا) قابل توجیه می‌باشد. نتایج بررسی تغییرات عرض رودخانهٔ قره‌سو در ۳۸ مقطع عرضی انتخابی در طول مسیر رودخانه، کاهش عرض رودخانه در طی ۱۹ سال اخیر را به طور واضح نمایان ساخت (جدول ۲). اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی این ۳۸ مقطع عرضی نشان داد که بیشترین فراوانی عرض رودخانهٔ قره‌سو در سال ۲۰۰۵ نزدیک ۱۳ متر و همچنین بیشترین فراوانی عرض رودخانه، در سال ۲۰۲۴ نزدیک ۴ متر می‌باشد (شکل‌های ۸ و ۹).

تأثیر احداث سد بر الگو و عرض مجرای پایین‌دست رودخانه توسط افراد متعددی از جمله سوریان (Surian, 1999)، ویلیامز و همکاران (Williams, Wolman & Wolman, 1984)، چرچ و همکاران (Church, Kellerhals & Day, 1989) و شیلدز و همکاران (Shields et al., 2000)، مورد بررسی قرار گرفته است. سدهای مخزنی یکی از سازه‌های عظیم آبی هستند که به منظور ذخیره آب رودخانه‌ها برای تنظیم مصارف شرب، کشاورزی و صنعت ساخته می‌شوند. سدهای مخزنی با تغییر در عرض مجرا، عمق جریان، اندازهٔ مصالح بستر و پوشش گیاهی کناره‌ها بر هندسه هیدرولیکی رودخانه در پایین دست تأثیر می‌گذارند (Shin & Julien, 2011). سد سبلان از نوع سنگ‌ریزه‌ای با هستهٔ رسی، در ۵۵ کیلومتری شمال غربی شهر اردبیل و در فاصلهٔ ۴۰ کیلومتری شمال شرقی مشکین‌شهر واقع شده است. تنظیم سالانه ۱۱۵ میلیون مترمکعب رواناب رودخانه قره‌سو از اهداف اصلی احداث این سد به شمار می‌آید. به طورکلی احداث سد سبلان بر روی رودخانهٔ قره‌سو به صورت مستقیم و غیرمستقیم مورفولوژی مجرای رودخانه را تحت تأثیر قرار داده است. در بررسی نقش مستقیم سد سبلان بر مورفولوژی پایین‌دست سد، می‌توان گفت که با احداث سد سبلان، هر چند کاهش جریانات لب‌پری و لب‌ریزی و به تبع آن جریانات مؤثر، به عنوان دبی‌های شکل‌دهنده مجرا، باعث کاهش دینامیک جانبی مجرای رودخانه شده است. اما همین امر، مجموعه‌ای از تغییرات مورفولوژیکی، به ویژه به‌صورت تغییر الگوی رودخانه، کاهش مساحت سطح مقطع عرضی، تثبیت پشته‌های کناری و میانی و نیز کاهش عرض و تنگ‌شدگی مجرا، را به همراه داشته است.

1 -Lateral Stability Index
2 -Unchange Active Channel Area
3- Previous Active Channel Area
4- Change Active Channel Area
5- Lateral Mobility Index



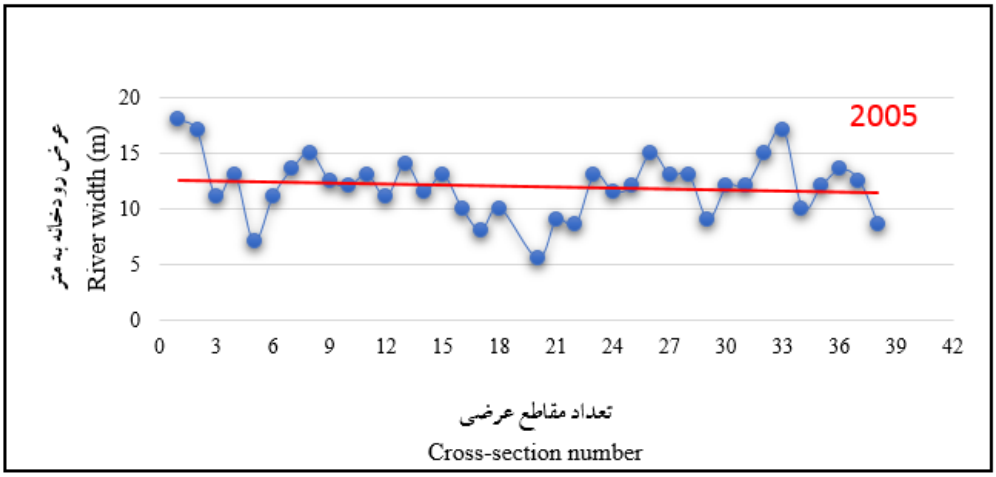
شکل۷- نحوهٔ محاسبه شاخص پایداری جانبی رودخانهٔ قره‌سو در بخشی از بازهٔ پنجم

Fig.7. Method of calculating the lateral stability index of the Qara-Su River (fifth reach)

جدول ۲- خلاصهٔ نتایج تغییرات عرض رودخانه قره‌سو در محدودهٔ مورد مطالعه (۳۸ مقطع انتخابی)

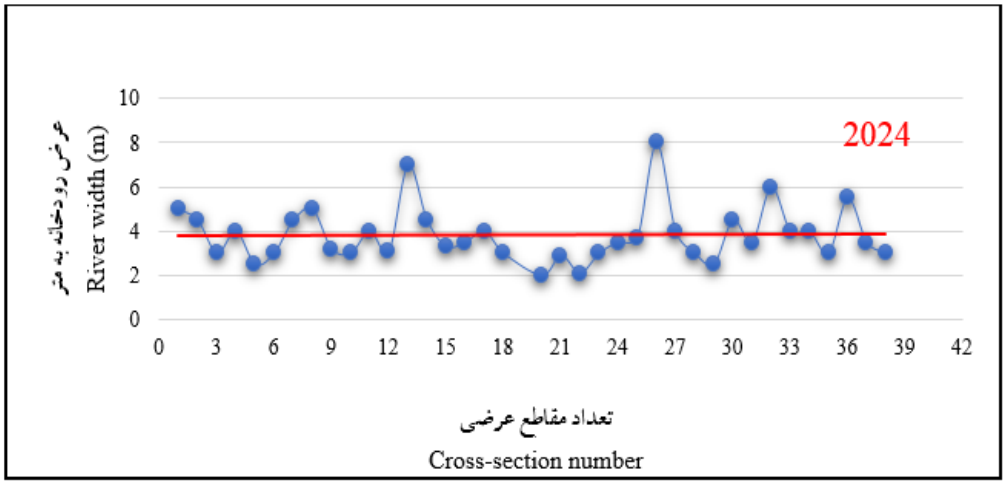
Table 2- Summary of changes in the width of the Qara-Su River in study area (selected 38 cross-sections)

حداکثر عرض(متر) ۲۰۲۴ Maximum width (m) in 2024	حداقل عرض(متر) ۲۰۲۴ Minimum width (m) in 2024	میانگین عرض(متر) ۲۰۲۴ Average width (m) in 2024	حداکثر عرض(متر) ۲۰۰۵ Maximum width (m) in 2005	حداقل عرض(متر) ۲۰۰۵ Minimum width (m) in 2005	میانگین عرض(متر) ۲۰۰۵ Average width (m) in 2005	بازه‌های انتخابی Selected reaches
5	2.5	3.8	18	7	13.2	بازهٔ اول First reach
5	3	3.7	15	11	12.8	بازهٔ دوم Second reach
7	3.1	4.3	14	10	11.9	بازهٔ سوم Third reach
4	2.1	2.8	10	5.5	8.2	بازهٔ چهارم Fourth reach
9	3	4.6	13	11.5	12.9	بازهٔ پنجم Fifth reach
6	2.5	3.9	17	9	13	بازهٔ ششم Sixth reach
5.5	3	3.8	13.5	8.5	11.3	بازهٔ هفتم Seventh reach



شکل۸- تغییرات عرض رودخانهٔ قره‌سو در سال ۲۰۰۵

Fig.8. Changes in the width of the Qara-Su River in 2005



شکل۹- تغییرات عرض رودخانهٔ قره‌سو در سال ۲۰۲۴

Fig.9. Changes in the width of 3.the Qara-Su River in 2024

الگوبرداری مستخرج از بررسی تصاویر ماهواره‌ای IRS با قدرت تفکیک ۲/۵ متر برای سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۴ (قبل و بعد از احداث سد) نشان داد که مجرای رودخانهٔ قره‌سو در اکثر بازه‌های مورد مطالعه دچار تنگ‌شدگی شده است (جدول ۲). همچنین، به‌صورت غیرمستقیم، وجود سد سبلان و اندازهٔ حجم مخزن آن (ازنظر تناوب وقوع سرریز جریان) سبب افزایش تجاوزات به محدوده حریم و بستر (حتی بستر اصلی جریان) رودخانه شده و موجب ایجاد ایمنی کاذب در پایین‌دست سد، گردیده است. در واقع با احداث سد سبلان بخش وسیعی از اراضی حریم و بستر رودخانهٔ قره‌سو (به ویژه پشته‌های کناری خم رودخانه) توسط کشاورزان منطقه به کاربری کشاورزی تبدیل شده که یکی از عوامل اصلی در تنگ‌شدگی مجرای رودخانه قره‌سو به شمار می‌آید (شکل‌های ۷ و ۸).

به عبارت دیگر با توجه به طول ۷۲ کیلومتری رودخانهٔ قره‌سو در پایین‌دست سد سبلان و افزایش سطح حوضه و ورود شاخه‌های فرعی، سهم سد سبلان در کنترل دبی جریان کاهش‌یافته و میزان تأثیر آن تا اولین تلاقی‌های رودخانه قره‌سو (چای‌لاخ و قطورسویی) می‌باشد. در واقع با توجه به تلاقی رودخانه‌های مهمی چون خیاوچای، قطورچای، آلنی‌چای و رودخانه چای‌لاغ در پایین‌دست سد سبلان که اغلب همراه با رژیم سیلابی به ویژه در فصل بهار می‌باشند، بخش وسیعی از رودخانه قره‌سو هنوز تحت تأثیر مخاطره

سیلاب قرار داشته و بررسی مخاطرات سیلابی در این منطقه حائز اهمیت می‌باشد. کنترل جریان پایه، باعث رشد گیاهان و تثبیت پشته‌های رسوبی موجود در بستر و کناره‌های رودخانه می‌گردد که نشانه‌های پایداری کاذب رودخانه قره‌سو می‌باشد. در واقع با توجه به تنگ‌شدگی مجرای رودخانه قره‌سو در طی سال‌های اخیر عبور جریان‌های سیلابی از مجرای رودخانه با مشکل روبه‌رو شده و سبب خروج آب از مجرای رودخانه و جاری شدن سیلاب در پهنهٔ دشت سیلابی خواهد شد. در نتیجه، در صورت وقوع سیلاب‌های بزرگ و سرریز قابل توجه جریان با توجه به تنگ‌شدگی مجرا، باید انتظار تغییرات شدید رودخانه و آسیب‌پذیری اراضی کشاورزی حاشیه رودخانهٔ قره‌سو را داشت.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد تغییرات کاربری اراضی صورت گرفته در نواحی دشت سیلابی رودخانه قره سو طی بازهٔ زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ با سرعت بالایی اتفاق افتاده و در ادامه سبب تنگ‌شدگی مجرای، کاهش ظرفیت عبور رودخانه و در نهایت افزایش آسیب پذیری سیلابی رودخانه شده است. نتایج طبقه‌بندی نظارت شده تصاویر Landsat و Sentinel-2، با دقت کلی به ترتیب حدود ۹۳ درصد (۲۰۲۴) و ۹۱ درصد (۲۰۰۵) و ضرایب کاپای ۰/۸۸ و ۰/۸۵، بیانگر صحت و پایایی بالای تحلیل‌های جغرافیایی انجام شده است. نتایج تحلیل تغییرات کاربری اراضی نشان داد که وسعت کاربری کشاورزی در بیشتر بازه‌های مورد مطالعه (برای مثال بازهٔ اول ۱۱۶ هکتار، بازهٔ دوم ۲۵۲ هکتار و بازهٔ سوم ۲۰۳ هکتار) افزایش داشته است که این موضوع نشان دهندهٔ پیش‌روی فعالیت‌های کشاورزی به قسمت‌های حریم و حتی بستر فعال رودخانهٔ قره‌سو بوده که سبب ایجاد یک پایداری کاذب ناشی از تثبیت پوشش گیاهی حاشیهٔ رودخانه شده است. همچنین نتایج محاسبات شاخص پایداری جانبی مجرا نشان‌داد، میزان این شاخص برای بازهٔ اول عدد ۰/۳۲، بازهٔ دوم ۰/۳۱، بازهٔ سوم ۰/۲، بازهٔ چهارم ۰/۲۱، بازهٔ پنجم ۰/۱۷، بازهٔ ششم ۰/۱۶ و برای بازهٔ هفتم عدد ۰/۱۷ می‌باشد. مقدار پایین شاخص پایداری بازه‌های مختلف رودخانه قره‌سو با توجه به آهنگ مهاجرت پایین آن، نشان‌دهنده میزان پایین مساحت مجرای فعال تغییر نیافته در طول دوره مورد بررسی می‌باشد که علت آن نیز تنگ‌شدگی مجرای رودخانه قره‌سو بوده است. احداث سد سبلان در بالادست محدودهٔ مورد مطالعه در واقع از یک سو سبب کاهش دبی‌های شکل دهنده مجرای رودخانه، تضعیف دینامیک جانبی مجرا و تثبیت پشته‌های کناری رودخانه قره‌سو شده و از سوی دیگر نیز ایمنی کاذبی را در نواحی پایین دست خود ایجاد کرده است که در صورت سیلابی شدن تلاقی‌های مهمی چون خیاوچای، قطورچای، آلنی‌چای و رودخانه چای‌لاغ، احتمال سرزیر و آب گرفتگی دشت سیلابی رودخانه را برای دوره های بازگشت بیش از ۱۰ سال به وجود خواهد آورد. در مجموع می‌توان گفت تغییرات کاربری اراضی صورت گرفته در طی ۱۹ سال اخیر در دشت‌سیلابی رودخانهٔ قره‌سو باعث کاهش ظرفیت جریان عبوری آب در مجرای رودخانه شده و علی‌رغم تحرک جانبی پایین رودخانه، احتمال وقوع مخاطره سیلابی را در محدوده دشت‌سیلابی افزایش داده است. از این رو می‌توان با اتخاذ سیاست‌های کاربردی و مهمی چون پایش سالانه تغییرات کاربری اراضی در محدوده دشت‌سیلابی و نیز ایجاد ممنوعیت در فعالیت‌های کشاورزی حاشیه رودخانه قره‌سو، گامی مؤثر در مدیریت صحیح این رودخانه مهم در استان اردبیل برداشت.

References

Al-Taei, A. I., Alesheikh, A. A., & Darvishi Boloorani, A. (2023). Land use/land cover change analysis using multi-temporal remote sensing data: a case study of Tigris and Euphrates Rivers Basin. *Land, 12*(5), 1101. https://doi.org/10.3390/land12051101

Asghari Sarsakanroud, S., & Saeedi Seta, A. (2023). Investigating the effect of land use changes on the runoff of the Qara chai River Basin using the SWAT model. *Geography and Environmental Planning, 34*(3), 95-118. [In Persian] https://doi.org/10.22108/gep.2023.134432.1535

Baajzadeh, Z., Shah-Hosseini, M., & Shayan, S. (2025). Evaluating the Effects of Anthropogenic and Tectonic Factors on Landform Changes with the Aim of Improving the Environment (Case Study: Shour River and Eshtehard Plain). *Environmental Erosion Research Journal, 15*(1), 1-24. https://doi.org/10.61186/jeer.15.1.1

Church, M., Kellerhals, R., & Day, T. J. (1989). Regional clastic sediment yield in British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences, 26*(1), 31-45. https://doi.org/10.1139/e89-004

Clerici, A., Perego, S., Chelli, A., & Tellini, C. (2015). Morphological changes of the floodplain reach of the Taro River (Northern Italy) in the last two centuries. *Journal of Hydrology, 527*, 1106-1122. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.063

Du, Z., Linghu, B., Ling, F., Li, W., Tian, W., Wang, H., ... & Zhang, X. (2012). Estimating surface water area changes using time-series Landsat data in the Qingjiang River Basin, China. *Journal of Applied Remote Sensing, 6*(1), 063609-063609. https://doi.org/10.1117/1.JRS.6.063609.

Esfandiyari Darabadi, F., Rafiei Mahmoodjagh, H., & Farzaneh, R. (2022). Investigation of land use changes in Zarrineh Rud catchment and its effect on soil erosion using WLC model. *Journal of Hydrogeomorphology, 8*(29), 68-45. [In Persian] https://doi.org/10.22034/hyd.2021.47572.1600

Fashae, O. A., & Olusola, A. O. (2017). Landuse types within channel corridor and river channel morphology of River Ona, Ibadan, Nigeria. *Indonesian Journal of Geography, 49*(2), 111-117. https://doi.org/10.22146/ijg.12738

Field, J., Tambunan, B., & Floch, P. (2014). *Pyanj river morphology and flood protection*. https://www.adb.org/sites/default/files/publication/42682/cwa-wp-06-pyanj-river-morphology.pdf

Fortugno, D., Boix-Fayos, C., Bombino, G., Denisi, P., Quiñonero Rubio, J. M., Tamburino, V., & Zema, D. A. (2017). Adjustments in channel morphology due to land-use changes and check dam installation in mountain torrents of Calabria (southern Italy). *Earth Surface Processes and Landforms, 42*(14), 2469-2483. https://doi.org/10.1002/esp.4197

Giardino, J. R., & Lee, A. A. (2011). *Rates of channel migration on the Brazos River*. Yangling: Department of Geology & Geophysics, Texas A & M University. https://texashistory.unt.edu/ark:/67531/metapth415066/m2/1/high_res_d/txca-0835.pdf

Hohensinner, S., Hauer, C., & Muhar, S. (2018). River morphology, channelization, and habitat restoration. In *Riverine ecosystem management: science for governing towards a sustainable future* (pp. 41-65). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3_3

Ibitoye, M. O. (2021). A remote sensing-based evaluation of channel morphological characteristics of part of lower river Niger, Nigeria. *SN Applied Sciences, 3*(3), 340. https://doi.org/10.1007/s42452-021-04215-1

Khaleghi, S., Roustaei, S., Khorshiddoust, A. M., Rezaei-Moghadam, M. H., & Ghorbani, M. A. (2016). Investigation of human role on morphological channel changes of Lighvan Chai River. *Geographic Space, 16*(55), 111–135. [In Persian] http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-944-fa.html

Liu, W., Wu, J., Xu, F., Mu, D., & Zhang, P. (2024). Modeling the effects of land use/land cover changes on river runoff using SWAT models: A case study of the Danjiang River source area, China. *Environmental research, 242*, 117810. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117810

Module, F. L. A. A. S. H. (2009). *Atmospheric correction module: Quac and flaash user's guide*. Version, 4, 44.

MPOI (2005). Guidelines for Flood Zoning and Delineation of Riverbed and Riparian Zone. Management and Planning Organization of Iran Press, Tehran. [In Persian] https://waterstandard.wrm.ir/uploaded_files/DCMS/WRMResearch_files/307-s.pdf

Nath, A., & Ghosh, S. (2022). Assessment of river morphology based on changes in land use and land cover and the spatial and temporal variation of meandering parameters of the barak river. *Water Practice & Technology, 17*(11), 2351-2370. https://doi.org/10.2166/wpt.2022.114

Nones, M., Guerrero, M., Schippa, L., & Cavalieri, I. (2024). Remote sensing assessment of anthropogenic and climate variation effects on river channel morphology and vegetation: Impact of dry periods on a European piedmont river. *Earth Surface Processes and Landforms, 49*(5), 1632-1652. https://doi.org/10.1002/esp.5791

Qin, Y., Jin, X., Du, K., & Jin, Y. (2024). Changes in river morphology and influencing factors in the upper Yellow River over the past 25 years. *Geomorphology, 465*, 109397. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109397

Rhodes, E. C., Talchabhadel, R., & Jordan, T. (2024). A changing river: Long-term changes of sinuosity and land cover in the Navasota River Watershed, Texas. *River, 3*(2), 152-165. https://doi.org/10.1002/rvr2.85

Richard, G. A. (2001). *Quantification and prediction of lateral channel adjustments downstream from Cochiti Dam*, *Rio Grande, New Mexico*. Colorado State University. https://www.proquest.com/openview/245b8fbb4e008aa6d75a66255376708c/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y

Richard, G. A., Julien, P. Y., & Baird, D. C. (2005). Case study: modeling the lateral mobility of the Rio Grande below Cochiti Dam, New Mexico. *Journal of Hydraulic Engineering, 131*(11), 931-941. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:11(931)

Roccati, A., Luino, F., Turconi, L., Piana, P., Watkins, C., & Faccini, F. (2018). Historical geomorphological research of a Ligurian coastal floodplain (Italy) and its value for management of flood risk and environmental sustainability. *Sustainability, 10*(10), 3727. https://doi.org/10.3390/su10103727

Shields Jr, F. D., Simon, A., & Steffen, L. J. (2000). Reservoir effects on downstream river channel migration. *Environmental Conservation, 27*(1), 54-66. https://doi.org/10.1017/s0376892900000072

Shin, Y. H., & Julien, P. Y. (2011). Effect of flow pulses on degradation downstream of Hapcheon Dam, South Korea. *Journal of Hydraulic Engineering, 137*(1), 100-111. https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000287

Surian, N. (1999). Channel changes due to river regulation: the case of the Piave River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, *24*(12), 1135-1151. https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199911)24:12%3C1135::AID-ESP40%3E3.0.CO;2-F

Wang, Y., Borthwick, A. G., & Ni, J. (2022). Human affinity for rivers. *River, 1*(1), 4-14. https://doi.org/10.1002/rvr2.12

Williams, G. P., Wolman, M. G., & Wolman, M. G. (1984). *Downstream effects of dams on alluvial rivers* (Vol. 1286). US Government Printing Office. https://doi.org/10.3133/pp1286

Vol. 15, No. 1, Spring 2026, p. 23-46 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94962.1603 OPEN ACCESS

Normalized Longitudinal River Profiles Pattern Analysis in Selected Basins of the Makran Accretionary Prism

Reza Mansouri [1*]

[1] Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 17 July 2025

Revised: 10 October 2025

Accepted: 11 October 2025

Available Online:

11 October 2025

Keywords:

Normalized Longitudinal River Profile

Drainage network analysis

Concavity Index (CT)

Transient landscape

Active Tectonics

Tectonic Geomorphology

ABSTRACT

Longitudinal river profiles are among the most widely used approaches for analyzing short-term landscape responses. Compared to conventional longitudinal profiles, normalized longitudinal profiles provide enhanced interpretability and more effectively highlight slope breaks. This study investigates the geomorphic response patterns of streams within selected basins located in the Makran Accretionary Prism, using DEM derived normalized longitudinal profiles generated by the NProfiler plugin. A total of 37 streams, including five main channels and 32 tributaries, were selected and analyzed. The results indicate that all main channels and most tributaries exhibit concave longitudinal profiles, as reflected by positive concavity parameter (CT) values. The CT values for the main channels range from 29.89% to 52.47%, whereas those for the tributaries vary between 1.38% and 64.39%. Among the main channels, the maximum and minimum CT values correspond to the Kahir and Jagin rivers, respectively, while among the tributaries they are associated with B6 and J1. The most linear and most convex longitudinal profiles in the study area are observed in the J1 (CT = 1.38%) and B7 (CT = −11.36%) channels, respectively. The dominance of concave profiles suggests an erosion-dominated landscape in a state of relative dynamic equilibrium. Only two profiles display negative concavity values, indicating a tendency toward convexity. These convex profiles are primarily associated with small sub-basins, headwater reaches, and intensely faulted zones in the northern Makran highlands within the Bahukalat and Jagin basins, reflecting a transient landscape state likely linked to localized tectonic uplift.

* Corresponding author: Reza Mansouri E-mail address: Rezamansouri@gep.usb.ac.ir

How to cite this article: Mansouri, R. (2026). Normalized Longitudinal River Profiles Pattern Analysis in Selected Basins of the Makran Accretionary Prism. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *15*(1), 23-46. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.94962.1603

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Early morphometric methods from the 1980s (Pérez-Peña et al., 2017) presented computational challenges for large-scale analyses, limiting investigations to localized areas with restricted datasets (e.g., Mackin, 1948; Hack, 1957; Seeber & Gornitz, 1983; Merrits & Vincent, 1989). However, in recent times, there have been significant advances in the scientific discussion over the suitability and meaning of some of these topographic parameters (Keller & Pinter, 2012; Wobus et al., 2006a; Goldrick & Bishop, 2007; Pérez-Peña, Azañón & Azor, 2009a; Kirby & Whipple, 2012; Royden & Taylor Perron, 2013). The advancement of ArcGIS software and the widespread availability of digital elevation models (DEMs) with varying spatial resolutions have significantly transformed and evolved spatial analysis methodologies for geomorphic landscapes. As highlighted by several researchers (Kirby & Whipple, 2001; Grohmann et al., 2007; Zang et al., 2011; Pérez-Peña et al., 2017), the aforementioned factors facilitate the analysis of remote regions exhibiting significant geological and tectonic importance. Consequently, they contribute to a more comprehensive understanding of the dynamic processes operating within these areas.

The drainage pattern of rivers contains unique information about the past and present tectonic regime. The longitudinal profile of a river is sensitive to the ongoing process of uplift and can be used to recognize active structures (Seeber & Gornitz, 1983). The extraction and analysis of longitudinal river profiles from digital elevation models has become a prevalent methodology in contemporary tectonic geomorphology. This approach facilitates the evaluation of drainage network dynamics to a range of environmental controlling factors. In recent years, geoscientists have increasingly employed topographic and drainage network analyses as effective tools within the field of tectonic geomorphology (e.g., Pérez-Peña et al., 2009a; 2009b; 2010; Kirby and Whipple, 2012; Giaconia et al., 2012; Royden and Taylor Perron, 2013; Willet et al., 2014; Pérez-Peña et al., 2017). Longitudinal profiles are a standard tool used by geoscientists to analyze drainage network patterns. This is predicated on the understanding that, within a stable system, erosion occurs in equilibrium with uplift (Seeber & Gornitz, 1983), and that rivers continuously adjust their longitudinal profiles in response to the climatic, lithological, and tectonic characteristics of their respective regions. Alterations in topographic and drainage network configurations can serve as indicators of shifts in underlying controlling factors (e.g., Seeber & Gornitz, 1983; Rigon et al., 1996; Jackson et al., 1996; Brookfield, 1998; Pérez-Peña et al., 2009a, 2010; Kirby & Whipple, 2012; Giaconia et al., 2012). In this context, the comparison of normalized longitudinal river profiles can elucidate variations in river gradients, which are typically governed by the aforementioned factors. River gradients, which govern the rate of erosion, are generally adjusted to correlate varying discharge rates with corresponding erosion rates. Consequently, significant slope alterations in river profiles may suggest the presence of active faults intersecting these rivers (Seeber & Gornitz, 1983). Longitudinal river profiles (Pérez-Peña et al., 2017) are now recognized as a highly effective method for analyzing the short-term responses of geomorphic landscapes to recent active geological, lithological, and climate change processes. Therefore, drainage network patterns can be utilized to infer the initial phases of landscape evolution and their corresponding responses.

Material and Methods

This research aims to investigate and assess the geomorphic response patterns of rivers within select basins Bahukalat, Kahir, Sedich, Gabrik and Jagin situated in the Iranian sector of the Makran Accretionary Prism (MAP). The study will analyze these patterns in relation to environmental controlling factors, employing normalized longitudinal river profile extraction (Pérez-Peña et al., 2017) via the NProfiler plugin, which utilizes DEM data. Furthermore, topographic and geological data were sourced from topographic maps (scales of 1:250,000 and 1:50,000) and geological maps (scales of 1:100,000 and 1:250,000), respectively. The NProfiler plugin for ArcGIS offers researchers a streamlined and efficient implementation. This plugin enables the extraction of key information from longitudinal profiles within

the ArcGIS environment, significantly enhancing their subsequent analysis and interpretation (Pérez-Peña et al., 2017). The NProfiler Add-In facilitates the visualization of normalized longitudinal river profiles, along with their associated morphometric indices, including normalized concavity (CT), maximum concavity (Cmax), and length of maximum concavity (Lmax). This extension facilitates spatial analysis of drainage networks within the ArcMap environment.

Results and Discussion

In this study, 37 streams were selected and evaluated, comprising 5 main and 32 secondary streams. The longitudinal profiles exhibit notable characteristics. The data indicate that the main streams, along with many secondary streams, display high CT values. This means that most of the normalized longitudinal profiles have a concave shape. The results of this study underscore the significant influence of multiple active faults exhibiting both normal and reverse mechanisms (including the Chah Khan, Ghasr Ghand, and Bashagard Thrust) on the longitudinal profiles analyzed. As demonstrated by these profiles, the impact of these faults is readily apparent in the development of knickpoints and alterations in the longitudinal gradient of the rivers examined. The CT parameter variation for main streams ranges between 29.89% and 52.47%, while for secondary streams, it ranges from 1.38% to 64.39%. Furthermore, the maximum and minimum CT values observed in the main streams were associated with Kahir and Jagin, respectively. Among the secondary streams, the highest and lowest CT values were found in B6 and J1, respectively. The J1 (CT = 1.38%) and B7 (CT = -11.36%) streams exhibit the most linear and most convex longitudinal profiles within the region, respectively. The prevalence of concave profiles in the examined streams suggests a state of relative dynamic equilibrium in their longitudinal profiles, indicative of an eroded landscape. Moreover, the concavity value only becomes negative in two profiles, indicating a tendency towards convexity in the curve.

Conclusion

Normalized longitudinal river profiles facilitate the comparison of gradient variations across different rivers, potentially influenced by climatic, lithological, or tectonic factors. Normalized profiles offer enhanced interpretability compared to traditional longitudinal profiles, effectively highlighting knickpoints. The normalized longitudinal profiles of the main streams (Figure 8) and the majority of secondary streams profiles (Figure 10) exhibit a pronounced degree of concavity. This characteristic suggests a landscape subject to significant erosion. Specifically, concave normalized longitudinal profiles are indicative of a state of relative equilibrium within the river systems. Furthermore, analysis of the drawn profiles indicated that relatively linear, straight, and even convex profiles are associated with streams situated in the headwater regions of the basins. Although these profiles are found in limited areas in the region, they show the connection and influence of small sub-basins with low area with abundant faults (especially main thrusts) in the region, as well as the lithological diversity of the Makran highlands. This demonstrates that the streams in these areas (the upstream areas of Bahukalat and Jagin) are in a transient state.

جلد ۱۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵ ، ص ۴۶-۲۳ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94962.1603 دسترسی آزاد

تحلیل الگوی نیمرخ‌های طولی نرمال‌شدهٔ رودخانه در حوضه‌های منتخبِ منشور بَرافزایشی مکران

رضا منصوری[1*]

[1] گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹

کلمات کلیدی:

نیمرخ طولی نرمال‌شده رودخانه

تحلیل شبکه زهکشی

شاخص تقعر - تحدب (C_T)

چشم انداز ژئومورفیک گذرا

تکتونیک ژئومورفولوژی

جنوبشرق ایران

چکیده

نیمرخ‌های طولی رودخانه، یکی از رایج‌ترین شیوه‌های تحلیل و بررسی واکنش‌های کوتاه‌مدت چشم‌انداز می‌باشند. نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده نسبت‌به نیمرخ‌های طولی سنتی، تفسیر آسان‌تری دارند و شکست شیب را برجسته‌تر می‌کنند. در این پژوهش، به‌منظور بررسی الگوهای واکنش ژئومورفیک آبراهه‌های منتخب در حوضه‌های باهوکلات، کهیر، سدیج، گابریک و جگین واقع‌در منشور بَرافزایشی مکران، به‌طورویژه از نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده با به‌کارگیری افزونه NProfiler مبتنی بر DEM استفاده شده‌است. برای این منظور، درمجموع ۳۷ آبراهه (۵ اصلی و ۳۲ فرعی) گزینش و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهند همه آبراهه‌های اصلی و بیشتر آبراهه‌های فرعی، با ثبت مقادیر مثبت برای پارامتر تقعر، نیمرخ طولی مقعر دارند. دامنهٔ نوسانی پارامتر C_T برای آبراهه‌های اصلی بین ۲۹/۸۹٪ و ۵۲/۴۷٪ و در آبراهه‌های فرعی از ۱/۳۸٪ تا ۶۴/۳۹٪ متغیر است. همچنین، بیشترین و کم‌ترین میزان C_T در آبراهه‌های اصلی به‌ترتیب متعلق به کهیر و جگین؛ و در آبراهه‌های فرعی نیز به‌ترتیب متعلق به B6 و J1 می‌باشند. خطی‌ترین و محدب‌ترین نیمرخ طولی در منطقه نیز، به‌ترتیب متعلق به آبراهه J1 (C_T = 1.38%) و B7 (C_T = -11.36%) می‌باشد. مشاهدهٔ نیمرخ‌های مقعر در بسیاری از آبراهه‌های منتخب، نشان‌دهندهٔ وجود حالتی از تعادل نسبی در نیمرخ طولی رودخانه‌ها و چشم‌اندازی فرسایش‌یافته است. علاوه بر آن، تنها در دو نیمرخ مقدار تقعر منفی و منحنی به حالت محدب میل پیدا کرده‌است. نیمرخ‌های محدب، بر حوضه‌های کوچک، بخش سرچشمه و مناطق به شدت گسل‌خورده ارتفاعات شمالی مکران در حوضه‌های باهوکلات و جگین انطباق دارند. این یافته، گویای وجود حالت گذار چشم‌انداز و در ارتباط با فراخاست زمین‌ساختی در مقیاس محلی است.

* نویسندهٔ مسئول: رضا منصوری

E-mail: Rezamansouri@gep.usb.ac.ir

مقدمه

در گذشته، محاسبه و اندازه‌گیری بسیاری از روش‌های مورفومتریک پیشگام که در اوایل دهۀ ۱۹۸۰ میلادی پیشنهاد شده بودند، به سختی قابل انجام بودند (Pérez-Peña et al., 2017). از این‌رو، تجزیه و تحلیل‌ها به مناطق محلی با مجموعه‌ای از داده‌های کم، محدود می‌شدند (Mackin, 1948; Hack, 1957; Seeber & Gornitz, 1983). با این حال، طی سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیری در بحث‌های علمی پیرامون مناسب بودن و مفاهیم برخی از این‌گونه پارامترهای توپوگرافی انجام شده است (Keller & Pinter, 2002; Wobus et al., 2006; Goldrick & Bishop, 2007; Pérez-Peña, Azañón & Azor, 2009a; Kirby & Whipple, 2012; Royden & Taylor Perron, 2013). به عبارت دیگر، امروزه، به دلیل توسعه بسته نرم‌افزار ArcGIS و دسترسی مناسب به مدل‌های دیجیتالی ارتفاع (DEMs) با قدرت تفکیک مکانی متفاوت، روش‌های تحلیل فضایی چشم‌اندازهای ژئومورفیک، تحول و تکامل بسیاری یافته‌اند. بنابراین، همان‌طور که برخی از پژوهشگران (Kirby & Whipple, 2001; Grohmann, Riccomini & Alves, 2007; Zhang et al., 2011; Pérez-Peña et al., 2017) اشاره کرده‌اند، این دو عامل اخیر امکان تجزیه و تحلیل مناطق دورافتاده با اهمیت زمین‌شناسی و زمین‌ساختی بسیار بالا را فراهم کرده و به نوبه خود، درک بهتری از عملکرد فرآیندهای فعال در چنین مناطقی را ارائه می‌دهند.

الگوی زهکشی رودخانه‌ها حاوی اطلاعات منحصر به فردی در مورد رژیم زمین‌ساختی گذشته و حال است. نیمرخ طولی یک رودخانه به فرآیند فراخاستِ مداوم، حساس است و می‌تواند برای تشخیص ساختارهای پویا مورد استفاده قرار گیرد (Seeber & Gornitz, 1983). امروزه در ژئومورفولوژی زمین‌ساخت، استخراج نیمرخ‌های طولی رودخانه مبتنی بر مدل‌های دیجیتالی ارتفاع به منظور ارزیابی و تحلیل وضعیت شبکه زهکشی تحت تأثیر عوامل کنترل‌گر گوناگون محیطی، امری رایج و پرکاربرد شده است. در این راستا اخیراً، دانشمندان علوم‌زمین از میان روش‌های گوناگون موجود در ارتباط با تکتونیک ژئومورفولوژی، از تجزیه و تحلیل‌های مربوط به الگوهای توپوگرافیکی و شبکۀ زهکشی به طور گسترده و موفقیت‌آمیزی استفاده کرده‌اند (Pérez-Peña et al., 2009a; Pérez-Peña, Azañón, Azor, Delgado & González-Lodeiro, 2009b; Pérez-Peña, Azor, Azañón & Keller, 2010; Kirby & Whipple, 2012; Giaconia et al., 2012; Royden & Taylor Perron, 2013; Willett, McCoy, Taylor Perron, Goren & Chen, 2014; Pérez-Peña et al., 2017). دانشمندان علوم زمین معمولاً برای تجزیه و تحلیل الگوهای شبکۀ زهکشی، از نیمرخ‌های طولی استفاده می‌کنند؛ زیرا، از یک‌سو، در یک سیستم پایدار، فرسایش همگام با فراخاست پیش می‌رود (Seeber & Gornitz, 1983)؛ و از سویی دیگر، رودها به‌طور پیوسته نیمرخ طولی خود را متناسب با شرایط و وضعیت آب و هوایی، سنگ‌شناختی و زمین‌ساختی هر منطقه سازگار می‌کنند. بنابراین، هرگونه تغییری در الگوهای توپوگرافیکی و الگوهای شبکۀ زهکشی می‌تواند نشانگر تغییرات رخ داده در هریک از این عوامل کنترل‌گر باشد (Rigon et al., 1996; Jackson, Norris & Youngson, 1996; Brookfield, 1998; Pérez-Peña et al., 2009a, 2010; Kirby & Whipple, 2012; Giaconia et al., 2012). در این راستا، مقایسۀ نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده رودخانه‌ها می‌تواند تفاوت‌های موجود در گرادیان رودخانه که معمولاً تحت‌تأثیر شرایط سه‌گانۀ نام برده شده در بالا هستند را برجسته کند. به طور کلی، گرادیان‌های رودخانه، که میزان فرسایش را تعیین می‌کنند، به‌گونه‌ای تنظیم می‌شوند که نرخ‌های متفاوت فراخاست با نرخ‌های متفاوت فرسایش هم‌خوانی داشته باشند. بنابراین، تغییرات ناگهانی شیب در امتداد نیمرخ‌های رودخانه ممکن است نشان‌دهندۀ اثرات گسل‌های فعالی باشد که از این رودخانه‌ها می‌گذرند (Seeber & Gornitz, 1983).

امروزه، ثابت شده است که نیمرخ‌های طولی (Pérez-Peña et al., 2017)، یکی از بهترین تخمین‌ها برای تجزیه و تحلیل الگوهای رفتاری چشم‌اندازهای ژئومورفیک هستند. از این میان، نیمرخ‌های طولی رودخانه روش‌ی مناسب در ارتباط با بررسی و تحلیل واکنش چشم‌اندازها نسبت به نیروهای محرک درونی و بیرونی هستند. به همین دلیل، تجزیه و تحلیل نیمرخ‌های طولی رودخانه تاکنون به‌طور گسترده‌ای در مطالعات ژئومورفولوژی زمین‌ساخت و با هدف شناسایی تغییرات در عوامل کنترل‌کننده رودخانه، یعنی سنگ‌شناسی، آب و هوا، فراخاست زمین‌ساختی و فرآیندهای دامنه‌ای، مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Seeber &

Gornitz, 1983; Brookfield, 1998; Molin, Pazzaglia & Dramis, 2004; Brookfield, 2008; Pérez-Peña et al., 2009a; Kirby & Whipple, 2012; Giaconia et al., 2012; Antón, De Vicente, Muñoz-Martín & Stokes, 2014; Troiani, Galve, Piacentini, Della Seta & Guerrero, 2014; Scotti, Molin, Faccenna, Soligo & Casas-Sainz, 2014; Azañón et al., 2015). از یک‌سو، معمولاً شبکه زهکشی به آسانی توسط جنبش‌های زمین‌ساختی دچار آشفتگی نمی‌شود، زیرا رودخانه‌ها در تنگه‌های ژرف جریان یافته و تمایل دارند مسیرهای اولیه خود را به صورت پیش‌رونده، در طول تکامل زمین‌ساختی حفظ کنند (Seeber & Gornitz, 1983). از سوی دیگر، نیمرخ‌های طولی رودخانه، واکنش‌های کوتاه‌مدت چشم‌اندازهای ژئومورفیک را نسبت به تغییرات زمین‌ساختی، سنگ‌شناسی و آب و هوایی نشان می‌دهند. در نتیجه، از الگوی‌های شبکه زهکشی می‌توان برای استنباط مراحل اولیه این تکامل و واکنش‌های مرتبط با آن، بهره برد. همان‌طور که پرز-پنا و همکاران (Pérez-Peña et al., 2017)، خاطرنشان کرده‌اند، نیمرخ‌های طولی رودخانه، مناسب‌ترین روش برای بررسی و تحلیل واکنش‌های زمان‌های اخیر تا به‌امروز رودخانه‌ها نسبت‌به فرآیندهای فعال زمین‌شناسی و نیز تغییرات آب و هوایی هستند.

مطالعات پیشین بر ناپایداری و تغییرات شبکه زهکشی حوضه‌های واقع‌در کرانه‌های مکران اشاره داشته؛ به‌عنوان مثال، یمانی (Yamani, 1998) در پژوهشی بر دامنه ناپایداری بالاتر در حوضه رود جگین نسبت‌به دیگر حوضه‌های منطقه اشاره کرده‌است. بنابراین، هدف اصلی در این پژوهش، مطالعه و ارزیابی الگوهای واکنش ژئومورفیک رودها در حوضه‌های منتخب واقع‌در بخش ایرانی منشور بَرافزایشی مکران نسبت‌به عوامل کنترل‌گر محیطی با به‌کارگیری نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده رودخانه می‌باشد.

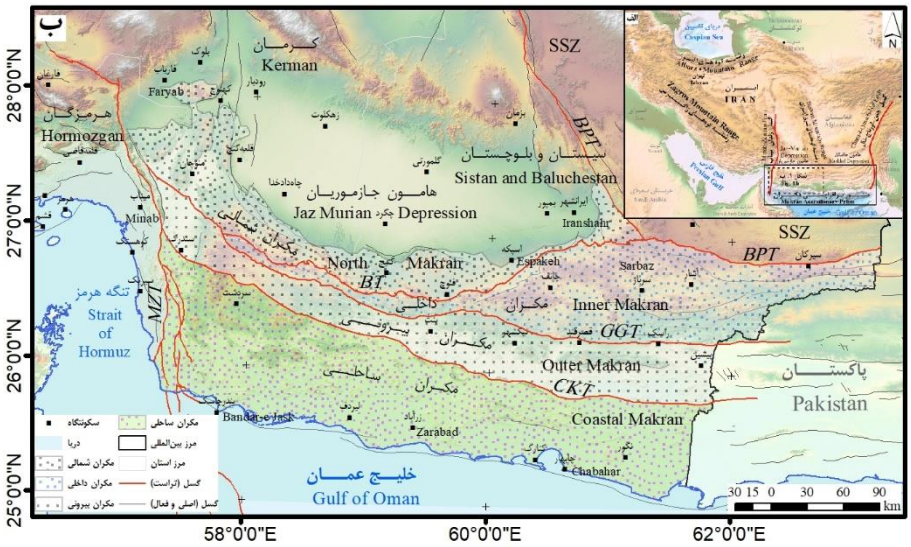
منطقهٔ مورد مطالعه

زون فرورانش مکران، با درازای تقریبی ۱۰۰۰ کیلومتر (Kopp et al., 2000; Burg, Dolati, Bernoulli & Smith, 2013; Burg, 2018)، به عنوان بخشی از کمربند کوه‌زایی آلپ – هیمالایا، براثر فرورانش پوسته اقیانوسی صفحه عربی به زیر پوسته قاره‌ای صفحه اوراسیا در گوشه جنوب‌خاوری ایران و بخش جنوبی پاکستان پدید آمده است. زون مکران، از نظر زمین‌شناسی، به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین گوه‌های بَرافزایشی سطح کره زمین به‌شمار می‌آید (Kopp et al., 2000; Burg et al., 2013)؛ به‌گونه‌ای‌که، منشور بَرافزایشی آن به‌عنوان یک منطقه فرورانش نادر و بی‌همتا در جهان به‌شمار می‌آید (Byrne, Sykes & Davis, 1992; Priestley et al., 2022; Irandoust, Priestley & Sobouti, 2022). این منشور، با روند کلی باختری– خاوری در دو سوی مرز ایران و پاکستان و در شمال خلیج عمان امتداد یافته است (شکل ۱ الف). به طور کلی، مکران در دوسوی باختر و خاور، توسط گسل‌های ترافشارشی با روند کلی شمالی– جنوبی دربرگرفته شده‌است. مرز باختری با سامانه گسلی امتدادلغز راست‌گرد زندان– میناب و مرز خاوری آن با سامانه گسلی امتدادلغز چپ‌گرد اوناچ– نال[1] (Stöcklin, 1968; Kopp et al., 2000; Bayer et al., 2006; Burg et al., 2013; Dolati & Burg, 2013; Penney et al., 2015; Burg, 2018; Barbero et al., 2020a; 2020b; 2021; 2023; 2025) مشخص می‌شود. زون مکران، از سوی شمال به هامون جازموریان در ایران و ماشکل در پاکستان و زون زمین‌درز سیستان واقع در مابین این دو فرورفتگی، محدود می‌شود. مرز جنوبی آن نیز توسط پشته میان‌اقیانوسی موری[2] مشخص شده است.

از لحاظ زمین‌شناسی، زون مکران را می‌توان به زیرزون‌های زمین‌ساختی– چینه‌شناختی گوناگون و متفاوتی همچون مکران شمالی، داخلی، بیرونی و ساحلی تقسیم‌بندی کرد (شکل ۱ ب). تاکنون این تقسیم‌بندی، در مطالعات پژوهشگرانی همچون دولتی (Dolati, 2010)، دولتی و برگ (Dolati & Burg, 2013)، برگ و همکاران (Burg et al., 2013)، محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2016)، برگ (Burg, 2018)، باربرو و همکاران (Barbero et al., 2020a; 2020b; 2021; 2025) به‌کاربرده شده است.

1- Ornach-Nal sinistral fault system
2- Murray Ridge

اما از دیدگاه ژئومورفولوژی، به‌عنوان یک واحد ژئومورفیک– مورفوتکتونیک مستقل و با عنوان واحد مکران یا جنوب‌خاوری ایران درنظر گرفته شده‌است. بر پایه این دیدگاه، در راستای شمال به جنوب و در ارتباط با شکل ظاهری ناهمواری، ساختمان زمین‌شناسی و جنس سنگ، می‌توان سه واحد متفاوت از جمله: جبهه داخلی، دیوارهٔ میانی و جبههٔ بیرونی تشخیص داد (Alaei-Taleghani, 2007).



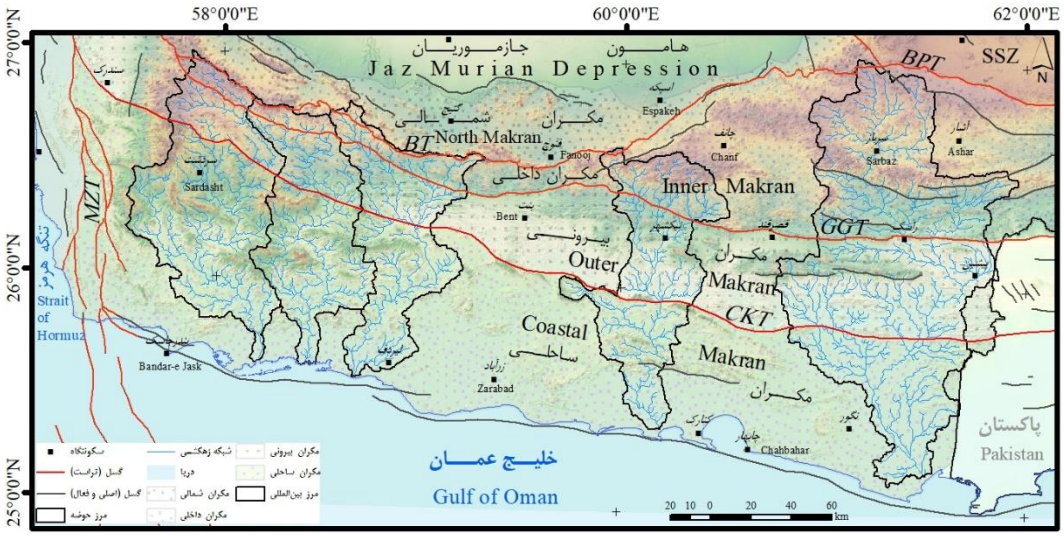
شکل ۱– الف) موقعیت جغرافیایی منشور بَرافزایشی مکران (نقشه پایه: ETOPO1 برگرفته از http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO1/image/color_etopo1_ice_full.tif.gz) ؛ ب) نقشهٔ ساده شده بخش ایرانی زون مکران به‌همراه زیرزون‌های زمین‌ساختی– چینه‌شناختی آن؛ حروف ایتالیک انگلیسی نشان‌دهنده گسل‌های تراستی اصلی هستند که مرز زیربخش‌ها را نیز تشکیل می‌دهند (CKT: تراست چاه‌خان، GGT: تراست قصرقند، BT: تراست بشاگرد، BPT: تراست بمپور، MZT: تراست میناب - زندان) (با تغییرات و اصلاحاتی از Dolati, 2010; Burg et al., 2013; Burg, 2018) و موقعیت گسل‌های اصلی و فعال[۱] منطقهٔ مورد پژوهش (Zelenin, Bachmanov, Garipova, Trifonov & Kozhu-rin, 2022). SSZ معرف زمین‌درز سیستان است.

Fig. 1. a) General setting of the Makran accretionary prism (base map from ETOPO1 http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO1/image/color_etopo1_ice_full.tif.gz); b) Simplified map of the Iranian part of the Makran zone with its tectonic-stratigraphic subzones; English italics indicate the main thrust faults that also form the boundaries of the subdivisions (CKT: Chah Khan Thrust, GGT: Ghasr Gand Thrust, BT: Bashagerd Thrust, BPT: Bampour Thrust, MZT: Minab-Zendan Thrust) (modified from Dolati, 2010; Burg et al., 2013; Burg, 2018) and the location of the main and active faults of the study area (Zelenin et al., 2022). SSZ represents the Sistan Suture Zone.

در این مطالعه، پنج حوضه آبریز اصلی واقع‌در بخش ایرانی منشور بَرافزایشی مکران که به‌ترتیب از خاور به باختر عبارتند از: حوضهٔ آبریز باهوکلات، کهیر، سدیج، گابریک و جگین (شکل۱ب)، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شبکهٔ زهکشی این حوضه‌ها از ستیغ ارتفاعات شمالی مکران تا کرانه‌های مکران جریان‌یافته‌اند. معیار اصلی در گزینش این حوضه‌ها، علاوه بر زهکشی گسترده‌ای بزرگ در راستای عمود بر زون مکران با پراکندگی فضایی مناسب، در برگرفتن زیرزون‌های گوناگون تعیین‌شده نیز بوده است. همان‌طور که در شکل۲ نیز به‌وضوح دیده می‌شود، مرز شمالی همه حوضه‌های مورد مطالعه منطبق بر مرزهای ساختاری زون مکران می‌باشند و غالباً توسط گسل‌های معکوس اصلی (عمدتاً گسل بشاگرد) محدود شده‌اند. همچنین، در این شکل به‌طور مشخص، امتداد باختری– خاوری تراست‌های اصلی منطقه در حوضه‌های موردمطالعه، دیده می‌شود؛ به‌طوری‌که از طریق آن‌ها می‌توان

۱. داده‌ها برگرفته از موسسهٔ زمین‌شناسی آکادمی علوم روسیه به نشانی: http://neotec.ginras.ru/index/english/sheets_eng.html

حوضه‌ها را به سه بخش مشخص و متمایز شمالی– بالادست، میانی و جنوبی– پایین‌دست تقسیم کرد. بخش ایرانی مکران، شامل رشته‌کوه‌هایی با روند باختری– خاوری است که ارتفاع آن غالباً از جنوب به شمال از سطح جلگه ساحلی تا حدود ۱۹۲۹ متر متغیر بوده و تنها در برخی نقاط به بیش از ۲۴۳۸ متر ارتفاع می‌رسد، سپس دوباره در دامنهٔ شمالی کاهش‌یافته و به هامون جازموریان فرو می‌رود (McCall & Kidd, 1982).



شکل ۲– موقعیت حوضه‌های منطقهٔ مورد مطالعه در منشور بَرافزایشی مکران (به‌ترتیب از راست به چپ: باهوکلات، کهیر، سدیچ، گابریک و جگین).

Fig. 2. Location of the basins of the study area in the Makran accretionary prism (right to left: Bahukalat, Kahir, Sedich, Gabrik, and Jagin).

زیرزون‌های زمین‌ساختی– چینه‌شناختی

مکران شمالی به گسل بشاگرد در جنوب و فرورفتگی هامون جازموریان در شمال محدود می‌شود. لیتولوژی مکران شمالی، عمدتاً شامل سنگ‌های آذرین کرتاسه و رسوب‌های مرتبط و نیز رخنمون‌های پراکنده و جزئی از سنگ‌های پالئوسن و ائوسن می‌باشد. به عبارت دیگر، این بخش از مکران، بیشتر شامل سنگ‌های آتشفشانی و رسوب‌های دریایی عمیق کرتاسه تا حداقل پالئوسن است که بخشی از آن‌ها در آمیزه‌های زمین‌ساختی[1] تجمیع شده‌اند (Burg et al., 2013). سنگ‌های اولترامافیک موجود در مکران شمالی، به یک مجموعه افیولیتی ژوراسیک-پالئوسن نسبت داده شده‌اند (McCall & Kidd, 1982). مکران داخلی، توسط گسل‌های تراستی بشاگرد و قصرقند، به ترتیب در شمال و جنوب، دربر گرفته شده و عمدتاً با توالی‌های ماسه‌سنگ-شیل قاره‌ای از نوع فلیش به سن ائوسن بالایی تا میوسن زیرین است که به‌طور هم‌شیب برروی رسوب‌های دریایی و سنگ‌های آتشفشانی پالئوسن تا ائوسن میانی قرار گرفته‌اند (Burg et al., 2013). حد شمالی و جنوبی مکران بیرونی، به‌ترتیب توسط گسل‌های تراستی قصرقند و چاه‌خان مشخص شده است. جنس سنگ و رسوب‌های این بخش عمدتاً متعلق به الیگوسن بالایی تا میوسن میانی است. در این بخش از مکران، رسوب‌های توربیدایتی و شیل‌های الیگوسن پایانی توسط رسوب‌های میوسن پوشانده شده‌اند. از ویژگی‌های غالب ساختاری این بخش، می‌توان به وجود چین‌خوردگی‌های باز و بزرگ با طول موج بلند همراه با رخنمون ضعیف در صفحه محوری اشاره کرد. این ساختارها، کوتاه‌شدگی کمتری نسبت به مکران داخلی نشان می‌دهند (Dolati & Burg, 2013; Burg et al., 2013).

1- Tectonic Mélanges

مکران ساحلی، مابین خط ساحلی– در جنوب و گسل تراستی چاه‌خان– در شمال واقع‌شده و به طور کلی، رسوب‌های میوسن بالایی و جوان‌تر را نشان می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر، رسوب‌های این بخش، عمدتاً از مارن با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگ آهکی، کنگلومرا و ماسه‌سنگ‌های رودخانه‌ای و دیگر رسوب‌های قاره‌ای؛ همچنین، ماسه‌سنگ‌ها و مارن‌های دریایی با ماسه‌سنگ‌های بیوکلاستیک آهکی میان‌لایه‌ای متعلق به میوسن پایانی تا پلیوسن تشکیل شده است (Burg et al., 2013; Burg, 2018). مکران ساحلی، به عنوان جوان‌ترین بخش منشور برافزایشی به شمار می‌آید (Kopp et al., 2000). این بخش، به‌طور ضعیفی تغییرشکل‌یافته، به‌گونه‌ای‌که در آن هیچ‌گونه گسل تراستی تشکیل‌نشده؛ در حالی که، وجود گسل‌های نرمال فراوان که بر اثر فرو رانش صفحه‌ای ایجاد شده‌اند، ساختار غالب این بخش می‌باشد (Kopp et al., 2000; Burg et al., 2013).

مواد و روش‌ها

امروزه، دسترسی آسان و گسترده به انواع مدل‌های دیجیتالی ارتفاع (DEMs) با وضوح بالا، تحلیل‌های ژئومورفولوژی زمین‌ساخت را از جنبه‌های روش‌شناختی و مفاهیم زمین‌شناختی بهبود بخشیده‌اند. تحلیل‌های مبتنی بر نیمرخ‌های طولی رودخانه، برای بررسی واکنش کوتاه‌مدت چشم‌انداز نسبت به فعالیت‌های زمین‌ساختی و تغییرات آب و هوایی ارزشمند هستند. نیمرخ‌های طولی رودخانه یکی از پرکاربردترین روش‌های بررسی و تحلیل واکنش‌های کوتاه‌مدت چشم‌انداز به‌شمار می‌آیند. امروزه، بیشتر این‌گونه تحلیل‌های مورفومتریک، در محیط نرم‌افزار ArcGIS انجام می‌شوند که به ابزارهای استانداردی برای انواع تحلیل‌ها تبدیل شده‌اند. در این پژوهش، از روش و افزونه جدید *NProfiler* (Pérez-Peña et al., 2017[1]) در محیط نسخه ۱۰/۸ نرم‌افزار ArcMap برای تهیه و استخراج نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده رودخانه[2] استفاده شده است. این افزونه، در محیط نرم‌افزار بسیار قدرتمند ArcGIS قابلیت اجرای آسان و سریعی به پژوهشگران می‌دهد. با به کارگیری این افزونه در محیط ArcGIS، می‌توان اطلاعات کلیدی و مهمی را از نیمرخ‌های طولی تولیدشده، استخراج نمود؛ به طوری که به روند تجزیه و تحلیل و تفسیر آن‌ها کمک شایانی می‌کند (Pérez-Peña et al., 2017). در واقع، سودمندی به‌کارگیری این افزونه در زمینه تجزیه و تحلیل نیمرخ‌های طولی در این است که، هم مدت زمان و هم فرآیند محاسبه استخراج نیمرخ‌های طولی رودخانه‌ها را به‌طور چشمگیری، کاهش می‌دهد.

در این مطالعه، علاوه بر ابزار مفهومی NProfiler در محیط ArcMap، از داده‌های فیزیکی دیگری همچون مدل دیجیتالی ارتفاع Alos Palsar منطقه با دقت مکانی ۱۲/۵ متر، نقشه‌های توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰ و ۱:۵۰,۰۰۰ (سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح کشور)، نقشه‌های زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ و ۱:۲۵۰,۰۰۰ به منظور استخراج گسل‌ها و واحدهای لیتولوژیکی (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)، لایه گسل‌های اصلی و فعال[3] منطقه، انواع تصاویر ماهواره‌ای (همچون لندست، سنتینل ۲ و کوئیک‌برد)، Google Earth، استفاده شده است. علاوه بر آن، داده‌های مربوط به تقسیم‌بندی و مرز حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها و نیز شبکه زهکشی، از سایت HydroSHEDS[4] تهیه شد. سپس، به منظور آماده‌سازی و برطرف‌کردن هرگونه خطای احتمالی و نیز انجام اصلاحات موردنیاز متناسب با هدف و ویژگی‌های منطقهٔ مورد مطالعه، این داده‌ها مورد بررسی قرار گرفته و تغییراتی در آن‌ها ایجاد شد. پس از انجام اصلاحات، مرز دقیق حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها تهیه و سپس جریان آبراهه اصلی شناسایی و ترسیم شد.

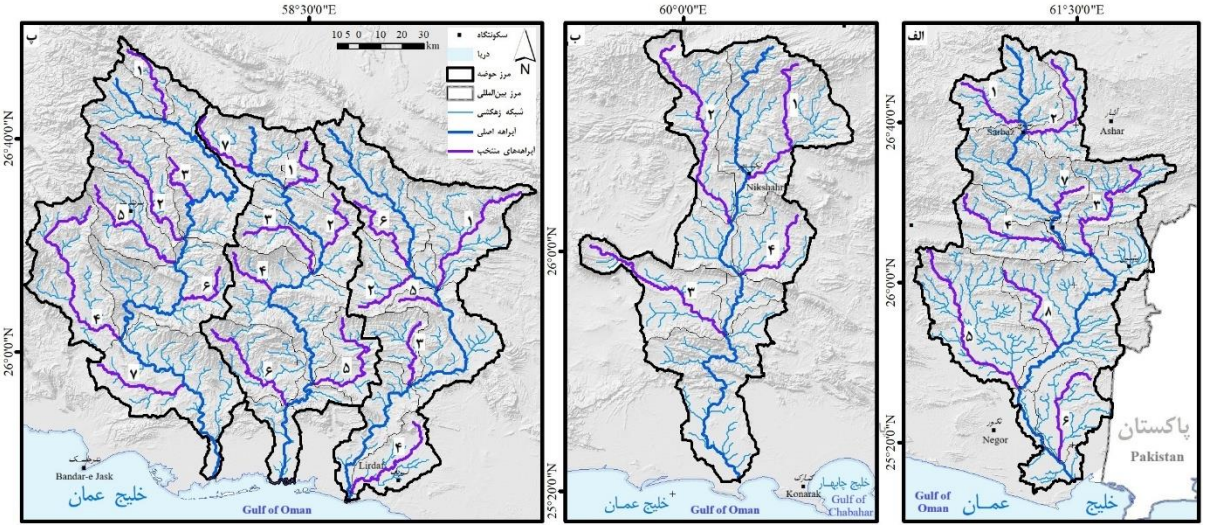
1- برای اطلاعات بیشتر به این منبع مراجعه شود.

2- Normalized longitudinal river profiles

۳- داده‌ها برگرفته از مؤسسه زمین‌شناسی آکادمی علوم روسیه به نشانی: http://neotec.ginras.ru/index/english/sheets_eng.html

4- این داده‌ها در آدرس: https://www.hydrosheds.org/products/hydrobasins قابل دسترس هستند. داده‌های مربوط به رودخانه‌ها شامل یک لایه‌برداری از تمامی جریان‌های آبراهه‌ای در مقیاس جهانی است که حداقل دارای حوضه آبریز در حدود ۱۰ کیلومترمربع یا حداقل یک جریان متوسط در حدود ۰/۱ مترمکعب بر ثانیه و یا هر دو مورد باشد. لایه‌های مربوط به تقسیم‌بندی و مرز حوضه‌ها و نیز شبکه آبراهه، با وضوح ۱۵ ثانیه قوسی و از لایه اصلی شبکه‌بندی‌شده موسوم به HydroSHEDS استخراج شده‌اند.

سپس، در هر حوضه مهم‌ترین آبراهه‌های فرعی که به جریان اصلی می‌پیوستند، برای تهیه و ساختن نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده مشخص شدند. بدین‌ترتیب، در مجموع ۳۷ آبراهه (۳۲ آبراهه فرعی و ۵ آبراهه اصلی برای هر حوضه) مشخص شد (شکل۳) که در بخش یافته‌های پژوهش به تشریح و تحلیل آن‌ها خواهیم پرداخت. در ادامه، با هدف آشنایی بیشتر با شیوهٔ معرفی شده برای تهیه و استخراج نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده رودخانه، روش‌شناسی، و چگونگی پیاده‌سازی آن در محیط ArcMap، به طور مختصر و مفید شرح داده شده است.



شکل ۳- آبراهه‌های اصلی و فرعی مشخص شده برای تهیهٔ نیمرخ‌های طولی نرمال شده در حوضه‌های الف) باهوکلات، ب) کهیر، پ) به ترتیب از راست به چپ: سدیچ، گابریک و جگین.

Fig. 3. Main and secondary streams identified for generating normalized longitudinal profiles in the basins of (a) Bahookalat, (b) Kahir, and ©, from right to left: Sadich, Gabrik, and Jegin.

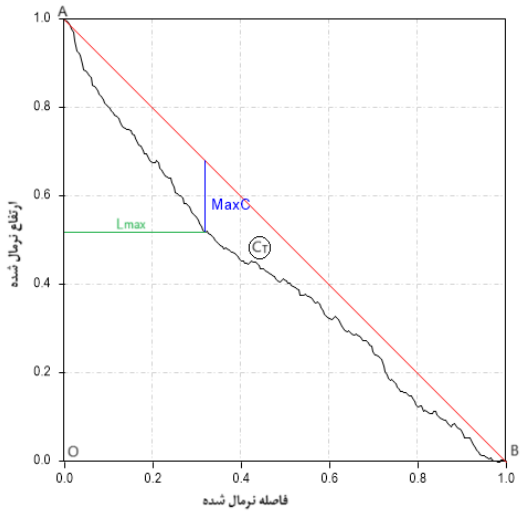
روش‌شناسی

رودخانه‌هایی که در شرایط تعادل و بر روی بسترهایی با سنگ‌شناسی همگن جریان دارند، یک نیمرخ مقعر معمولی ایجاد می‌کنند؛ به طوری که در مناطق سرچشمه (بخش بالادست)، گرادیان‌های بالاتر و در نزدیکی دهلنه (بخش پایین‌دست)، گرادیان‌های ملایم‌تری دارند. این نیمرخ مقعر، نتیجهٔ رابطه معکوس بین دبی و شیب است که به‌ترتیب می‌توان مقادیر آن‌ها را با اندازه‌گیری مساحت بخش بالادست و شیب کانال، تخمین زد. در رودخانه‌های درجه‌بندی‌شده، شیب به‌تدریج تنظیم می‌شود تا با توجه به دبی موجود و ویژگی‌های غالب کانال، سرعت مورد نیاز برای انتقال تمام بار رسوبی فراهم شود (Mackin, 1948). انحراف از این تعادل یا نیمرخ درجه‌بندی شده، معمولاً نقاط عطفی را در نیمرخ طولی رود ایجاد می‌کند که به‌عنوان نقاط شکست شیب[1] شناخته می‌شوند (Whipple & Tucker, 1999; Burbank & Anderson, 2012) و تغییراتی را در میزان تقعر نیمرخ طولی بالادست و پایین‌دست خود ایجاد می‌کنند (Pérez-Peña et al., 2017).

ایدهٔ اولیهٔ نمایش نیمرخ‌های طولی رودخانه به‌صورت نرمال‌شده، توسط دمولین (Demoulin, 1998) پیشنهاد داده شده است (Pérez-Peña et al., 2017). چنین نیمرخی، به عنوان نیمرخ طولی نرمال شده شناخته می‌شود و با نرمال‌سازی ارتفاعات نسبت به ارتفاع یا دامنه نسبی و فواصل نسبت به طول کل کانال ساخته می‌شود. ارائه و نمایش نیمرخ طولی رودخانه به این شکل، امکان مقایسهٔ رودخانه‌ها با درازا و گرادیان‌های متفاوت را فراهم می‌کند (Demoulin, 1998; Ruszkiczay-Rüdiger, Fodor, Horváth & Telbisz, 2009; Matoš, Tomljenović & Trenc, 2014). علاوه بر آن، چنین نمایش نرمال‌شده‌ای از نیمرخ، غالباً تغییرات

1- Knickpoints

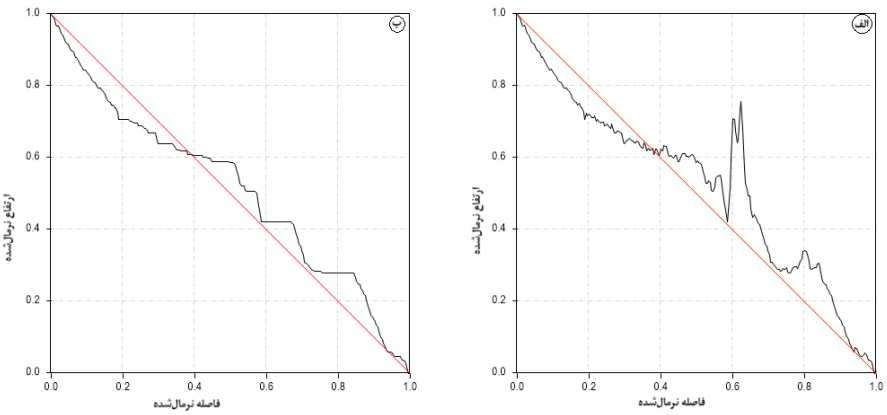
گرادیان را به صورت نیمرخ‌های نیمه‌لگاریتمی واضح، برجسته می‌کند (Hack, 1957; Demoulin, 1998). در این‌گونه از نیمرخ‌ها، شاخص تقعر (C_T) به عنوان درصد مساحت مثلث OAB (شکل ۴) مابین نیمرخ رودخانه و خط مستقیمی که سرچشمه را به دهانه رود متصل می‌کند، تعریف می‌شود. مقادیر منفی C_T نشان دهندهٔ نیمرخ‌های مقعر رو به بالا هستند که در آن نیمرخ رودخانه بالاتر از خط مستقیم AB قرار می‌گیرد؛ درحالی‌که، مقادیر مثبت نشان دهندهٔ محدب بودن نیمرخ رودخانه خواهند بود. نیمرخ رودخانه‌های مستقیم نیز با شاخص تقعر تقریباً صفر ($C_T \sim 0$) مشخص می‌شوند (شکل ۴). از آنجایی‌که شاخص تقعر رودخانه به صورت یک انتگرال محاسبه می‌شود، در هر نقطه از نیمرخ می‌توانیم یک تقعر محلی (Ci) را به عنوان فاصله از نیمرخ تا خط مستقیم AB تعریف کنیم. بااین‌فرض، می‌توانیم برای هر رودخانه‌یک نقطه با حداکثر تقعر (C_{max}) تعریف کنیم. این مقدار با شاخص تقعر رودخانه (C_T) تکراری و اضافی خواهد بود، اما موقعیت آن نسبت به سرچشمه رودخانه (L_{max}) می‌تواند اطلاعات بسیار جالبی را اضافه کند (شکل ۴). از نظر تئوری، هرچه L_{max} کمتر باشد، درجه‌بندی نیمرخ بهتر خواهد بود (Demoulin, 1998). کاستیللو و همکاران (Castillo, Bishop & Jansen, 2013) پیشنهاد کردند که این نوع نمایش برای رودخانه‌هایی در حالت گذار با نیمرخ‌های نامنظم، که در آن‌ها روابط سنتی مساحت- شیب معتبر نیستند، مناسب‌تر است. آن‌ها در مطالعهٔ خود نشان دادند که شاخص تقعر (Θ) معیار مفیدی از مورفولوژی بازه‌های گذار ارائه می‌دهد.



شکل ۴- طرحی شماتیک برای نمایش دوبعدی نیمرخ نرمال‌شده و پارامترهای مرتبط با آن. A: بالادست - سرچشمه، B: خروجی یا دهانه، CT: شاخص تقعر (که به صورت درصد و نسبت به سطح مابین منحنی نیمرخ و خط مستقیمی که سرچشمه و خروجی رودخانه را به هم متصل می‌کند (مثلث OAB) بیان می‌شود)، C_{max}: حداکثر تقعر، L_{max}: موقعیت حداکثر تقعر نسبت به سرچشمه رودخانه. برای توضیحات بیشتر به متن مراجعه شود (Demoulin, 1998; Pérez-Peña et al., 2017).

Fig. 4. Sketch illustrating the 2D Normalized profile and associated parameters. A: Headwater, B: mouth, CT: concavity index (expressed as a percentage respect to the AOB triangle), Cmax: maximum concavity, Lmax: position of maximum concavity relative to the source of the river (Demoulin, 1998; Pérez-Peña et al., 2017). See text for further explanation.

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده‌شده، نمونه‌هایی از نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده رودخانه در منطقهٔ مورد مطالعه ارائه شده است. در این شکل، تفاوت بسیار آشکاری میان منحنی نیمرخ نرمال‌شده در دو حالت پیش‌فرض– بدون حذف قله‌ها یا نقاط اوج در نیمرخ طولی رودخانه (شکل ۵ الف) و با انتخاب کاربر– اعمال گزینه حذف نقاط اوج، دیده می‌شود (شکل ۵ ب). به عبارت دیگر، با دخالت دادن گزینهٔ حذف نقاط اوج بر روی نیمرخ طولی نرمال‌شده رودخانه؛ علاوه بر نرم شدن خط نیمرخ، تغییرات منحنی شیب طولی رودخانه به‌طور بارزتری نشان داده می‌شود.



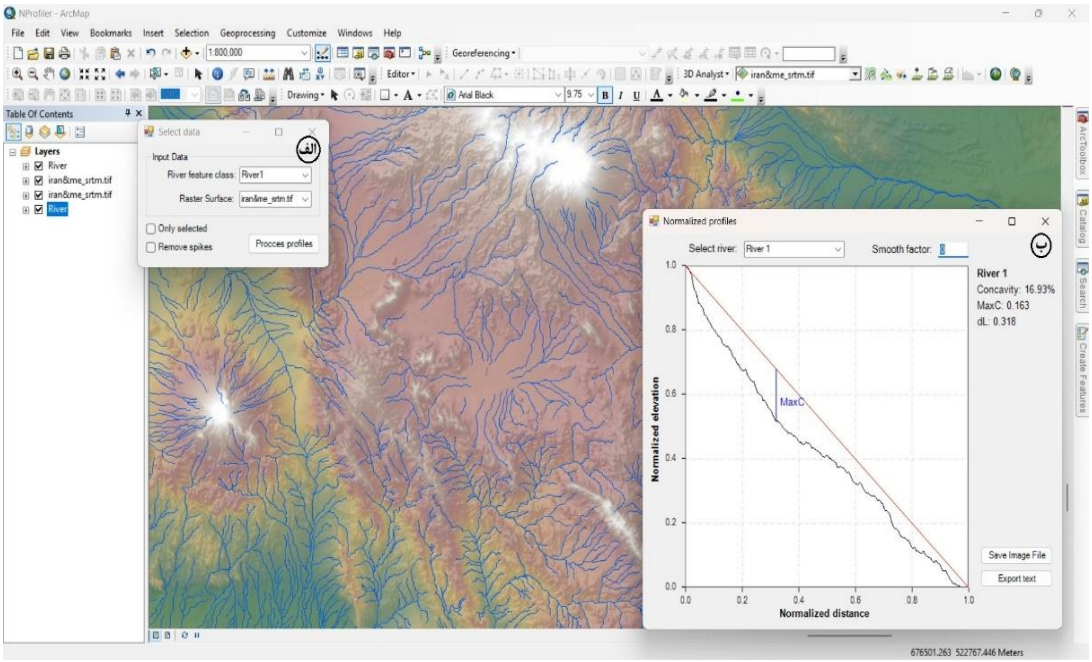
شکل ۵- نمونه‌هایی از ترسیم نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده رودخانه در منطقهٔ مورد مطالعه. الف) بدون در نظرگرفتن حذف قله‌ها یا نقاط اوج (حالت پیش‌فرض). ب) با اعمال حذف قله‌ها (با انتخاب کاربر).

Fig. 5. Examples of normalized longitudinal river profiles drawn in the study area. A) Without removing peaks (default mode). B) With removing peaks (user-selected).

شیوهٔ اجرا و پیاده‌سازی

ابزار جدید *NProfiler*، روشی نوین به صورت افزونه‌ای است که توسط پرز- پنا و همکاران (Pérez-Peña et al., 2017) در بستر Visual Basic.NET برنامه‌نویسی شده و به عنوان ابزاری بسیار کاربردی، برای اضافه شدن و ادغام با محیط نسخه ۱۰ نرم‌افزار بسیار قدرتمند شرکت ESRI (یعنی، محیط ArcGIS (ArcMap) ارائه شده است. بستر برنامه‌نویسی در Visual Basic.NET از چارچوب موجود در Microsoft.NET بهره‌گرفته و نه‌تنها شامل مجموعه کاملی از کتابخانه‌های قدرتمند است، بلکه یک رابط کاربری گرافیکی غنی مانند پنجره‌ها، جعبه‌های کنترل، منوها، نمودارهای گرافیکی و غیره را نیز شامل می‌شود. پرز-پنا و همکاران (Pérez-Peña et al., 2017) یادآور می‌شوند که این افزونه با در نظر گرفتن دو ویژگی بسیار مهم، یعنی «استفادهٔ آسان» و قابلیت «نمایش مستقیمِ نتایج در درون نرم‌افزار GIS»، طراحی شده است. همچنین، ورودی اصلی این افزونه، بر پایهٔ داده‌های رستری- مدل دیجیتالی ارتفاع (DEM)، بنا نهاده شده است. مزیت برتر تهیه نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده با ابزار NProfiler، ضمن سادگی در به‌کارگیری و کاربر پسند بودن آن، در این است که همهٔ مراحل آن در محیط نرم‌افزار GIS و به طور خودکار انجام می‌شود. به طوری که، با استفاده از آن، به راحتی می‌توان نیمرخ‌های طولی گوناگون و متفاوت را به همراه شاخص‌های مربوطه برای رودخانه‌ها تهیه و استخراج کرد. در این پژوهش، افزونه NProfiler (شکل۶) که به عنوان یک افزونه مستقل به منظور استخراج نیمرخ‌های نرمال شده و شاخص‌های مرتبط با آن در محیط ArcMap، ایجاد شده است، در محیط ArcGIS نسخه ۱۰/۸ به‌کار گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۶ الف نشان‌داده شده است، افزونه NProfiler در پنجره ورودی خود با استفاده از لایه خطی آبراهه‌ها و یک DEM به‌عنوان منبع ارتفاع توپوگرافیکی، نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده رودخانه و معیارهای مرتبط با پدیده‌های برداری آن را، تولید می‌کند. در این روش، استفاده از ArcObjects دسترسی به هندسه‌ها و سطوح رستری را بدون نیاز به تکرار برروی نقاط یا سلول‌ها را تسهیل می‌کند. همچنین، ارتفاع نیمرخ از طریق درون‌یابی دوسویه چهار سلول مجاورهم برروی DEM محاسبه می‌شوند، به طوری که سرانجام باعث نرم‌شدن و هموارسازی خطاهای ارتفاعی در سلول‌های منفرد می‌شود.

پس از استخراج نیمرخ، ارتفاعات و فواصل هر نیمرخ رودخانه برای محاسبه شاخص‌های C_T, C_{max}, L_{max} از ۰ تا ۱ نرمال‌سازی می‌شوند. این ابزار همچنین امکان حذف «قله‌ها» (یعنی نقاط با ارتفاع بالاتر از نقاط بخش سرچشمه یا بالادست رودخانه که معمولاً به‌دلیل خطاهای DEM ظاهر می‌شوند) و نرم و هموارسازی نیمرخ را فراهم می‌کند (شکل۵). روش نرم و هموارسازی از یک میانگین متحرک پنجره‌ای استفاده می‌کند که درصد نقاط ورودی نیمرخ را به عنوان یک عامل هموارسازی در نظر می‌گیرد. این هموارسازی به طور ویژه می‌تواند برای داده‌های با وضوح پایین‌تر مفید باشد. سرانجام، پنجرهٔ گرافیکی (شکل ۶ ب)، علاوه بر نشان دادن نیمرخ رودخانه انتخاب شده و پارامترهای مورفومتریک مرتبط با آن، امکان ذخیرهٔ نیمرخ تهیه شده به صورت تصویر یا برداری فراهم می‌کند. همچنین، در این پنجره امکان نرم‌کردن یا هموارسازی منحنیِ نیمرخ از طریق عامل هموارکننده[1]، نیز گنجانده شده است؛ به طوری که کاربر می‌تواند به دلخواه و متناسب با نیاز، مقدار آن‌را – که به طور پیش‌فرض صفر می‌باشد، تعیین کند.



شکل ۶- افزونهٔ NProfiler در محیط ArcMap 10.8. (الف) پنجرهٔ ورودی، به کاربر اجازه می‌دهد تا کلاس عارضه رودخانه (به صورت خطی) و منبع ارتفاع (مدل دیجیتالی ارتفاع) را انتخاب کند. (ب) پنجره خروجی، تمام نیمرخ‌های نرمال‌شده و پارامترهای مرتبط (C_T, L_{max}, C_{max}) را ترسیم کرده و امکان ذخیرهٔ فایل‌های تصویری را نیز فراهم می‌کند.

Fig. 6. NProfiler plugin in ArcMap 10.8. (a) The input window allows the user to select the river feature class (polyline) and the elevation source (digital elevation model). (b) The output window plots all normalized profiles and associated parameters (CT, Lmax, Cmax) and allows saving image files.

نتایج و بحث

نیمرخ‌های طولی نرمال شده، برای هر یک از آبراهه‌های اصلی و فرعیِ انتخاب‌شده در حوضه‌های پنج‌گانهٔ مورد مطالعه، تهیه و ترسیم شدند و به ترتیب در شکل ۸ و شکل ۱۰ ارائه شده‌اند. به طورکلی، نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده، ویژگی‌های بسیار جالبی را نشان می‌دهند؛ به‌گونه‌ای‌که بیشتر آن‌ها دارای نیمرخ‌های طولی مقعر واضحی هستند و مقادیر تقعر مثبت و نسبتاً بالایی را نیز نشان می‌دهند. در جدول۱ برخی از مقادیر مربوط به پارامترهای کمّی برای نیمرخ‌های طولی نرمال شده استخراج شده در

1. Smooth Factor

آبراهه‌های منتخب در حوضه‌های مورد مطالعه، ارائه شده است. با مشاهده و بررسی نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده استخراج شده، مشخص شد که مهم‌ترین پارامتر به ویژه در نیمرخ‌های طولی خطی و مستقیم (برای مثال، نیمرخ B7, S5 در شکل۴)، میزان شاخص تقعر (C_T) است، زیرا پارامترهای حداکثر تقعر (C_{max}) و موقعیت حداکثر تقعر نسبت به سرچشمه و بخش بالادست (L_{max}) (برای مثال، نیمرخ B5, S4 در شکل۴)، تنها در نیمرخ‌های مقعر معنا پیدا می‌کنند (شکل ۸ و شکل۱۰). این یافته، با نتایج به دست آمده توسط پرز-پنا و همکاران (Pérez-Peña et al., 2017)، همخوانی دارد. در ادامه، نیمرخ‌های طولی ترسیم شده برای آبراهه‌های اصلی و فرعی منتخب به تفکیک تشریح شده‌اند.

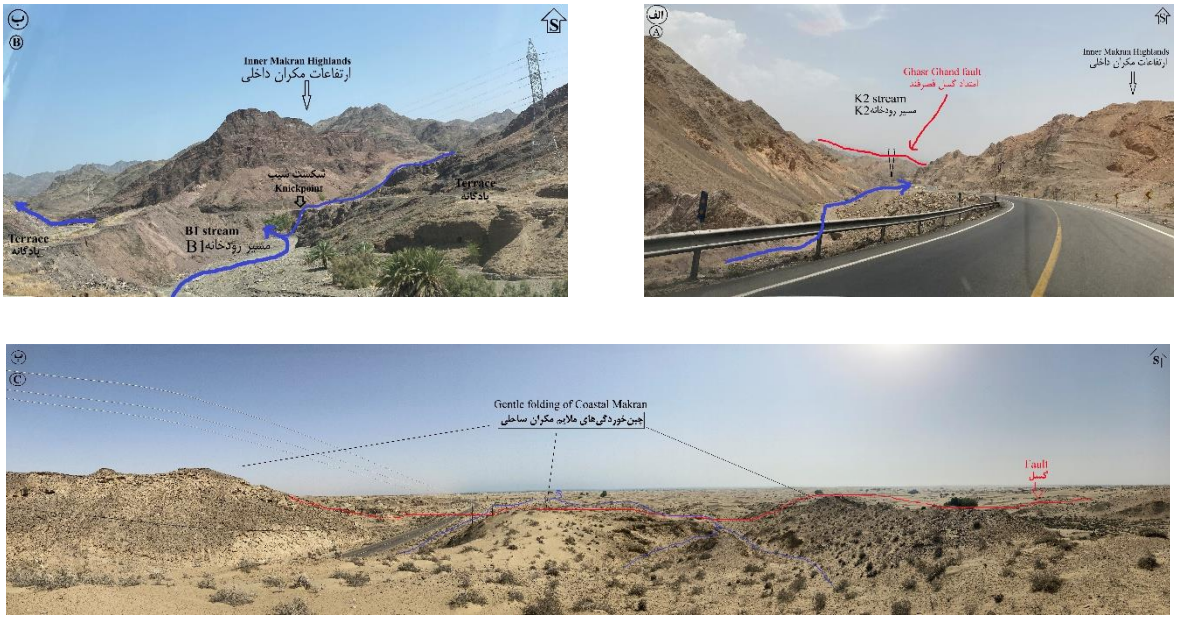
جدول ۱- برخی از مشخصات و اطلاعات کمّی برای نیمرخ‌های طولی نرمال شده در آبراهه‌های بررسی شده در منطقهٔ مورد مطالعه

Table 1- Some characteristics and quantitative information for normalized longitudinal profiles in the investigated streams in the study area.

نام حوضه Basin name	اطلاعات مربوط به پارامترها Parameters information						
	درازای آبراهه اصلی Main stream length (km)	تعداد آبراهه‌های فرعی Number of secondary streams	مهم‌ترین گسل‌ها Main faults	بیشترین میزان C_T Highest C_T value (%)	کم‌ترین میزان C_T Lowest C_T value (%)	خطی‌ترین نیمرخ The most linear profile	محدب‌ترین نیمرخ The most convex profile
باهوکلات (Bahukalat)	316.62	8	بشاگرد، قصرقند، چاه‌خان، پیشامگ، مورتان، پاشنگ،	B6 (C_T = 64.39%)	B1 (C_T = 12.21%)	-	B7 (C_T = -11.36%)
کهیر (Kahir)	194.92	4	پاشگیرم، زیردان، دینارکلک، کهورکان، گابریک، گاکوش،	K4 (C_T = 52.57%)	K2 (C_T = 13.91%)	-	-
سدیچ (Sedich)	206.90	6	جگین Bashakerd, Ghasr)	S4 (C_T = 50.01%)	S6 (C_T = 20.12%)	-	-
گابریک (Gabrik)	203.19	7	Ghand, Chah Khan, Pishamag, Murtan, Pashang, Pashgirm, Zirdan, Dinarkalak, Kahurakan, Gabrik,	G6 (C_T = 46.64%)	G2 (C_T = 18.83%)	-	-
جگین (Jagin)	227.25	7	(Gakosh, Jagin	J6 (C_T = 41.01%)	J1 (C_T = 1.38%)	J1 (C_T = 1.38%)	-
در مجموع Overall	-	32	بشاگرد، قصرقند، چاه‌خان Bashakerd, Ghasr) (Ghand, Chah Khan	B6 (C_T = 64.39%)	J1 (C_T = 1.38%)	J1 (C_T = 1.38%)	B7 (C_T = -11.36%)

نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده در آبراهه‌های اصلی

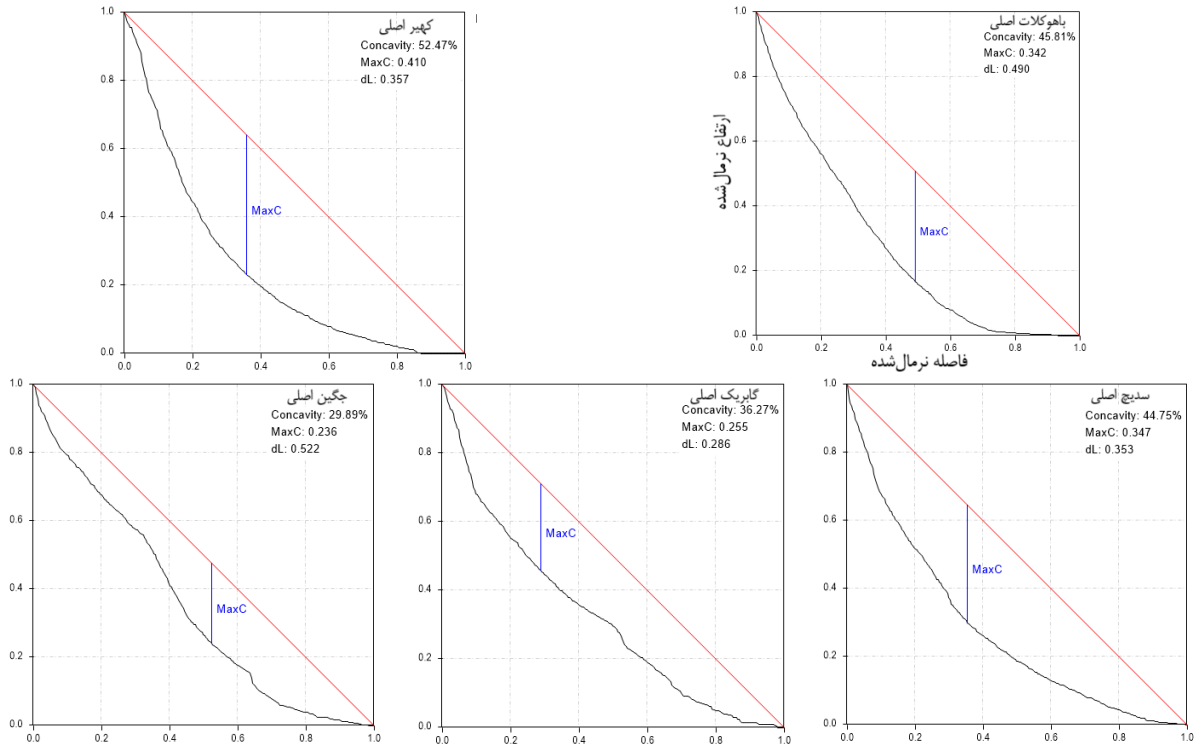
همه نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده در آبراهه‌های اصلی حوضه‌های منتخب، حالت مقعر را نشان می‌دهند (شکل۷ پ؛ شکل۸). بیشترین و کم‌ترین میزان شاخص C_T، به ترتیب مربوط به آبراهه اصلی کهیر (C_T = 52.47%) و جگین (C_T = 29.89%) می‌شوند (جدول۱). نکتهٔ مهم و قابل توجه که در همه آبراهه‌های اصلی حوضه‌های پنج‌گانه به طور مشترک دیده می‌شود، آن است که همگی در بخش سرچشمه و بالادست حوضه‌ها، نیمرخ تقریباً خطی و مستقیمی را نشان می‌دهند. این موضوع می‌تواند به دلیل تأثیرپذیری این بخش از حوضه‌ها از ساختار لیتولوژیکی ارتفاعات مکران (مکران داخلی و بیرونی) و زمین‌ساختی ناشی از عملکرد گسل‌های متعدد نرمال، معکوس و به‌ویژه تراست‌های اصلی و مهم (برای مثال، بشاگرد و قصرقند) باشد (شکل۷ الف و ب).



شکل ۷- چشم‌انداز هایی از حوضه‌های آبریز مورد مطالعه. الف) آبراهه شماره دو حوضه کهیر، ب) آبراهه شماره یک حوضه باهوکلات، پ) پایاب حوضه سدیچ (آبراهه شماره چهار).

Fig. 7. Some landscapes of the study basins. A) No.2 Main Stream of Kahir basin, B) No.1 Main tream of Bahukalat basin, C) Downstream of the Sedich basin (No.4 Stream).

به طور کلی، در آبراهه‌های اصلی باهوکلات، کهیر و سدیچ، گرادیان طولی نیمرخ با حالت تقعر کاملاً مشخصی آغاز شده و از بخش سرچشمه تا دهانه، به طور یکنواخت افزایش نشان می‌دهد؛ تا اینکه تقریباً در میانه مسیر و منحنی نیمرخ، حداکثر میزان تقعر (C_{Max}) رخ داده است (شکل۸). این در حالی است که، آبراهه اصلی گابریک، ضمن نشان دادن حالتی مشابه اما با درصد نسبتاً پایین‌تری از تقعر (C_T = 36.27%)، به طور مشخص در سه نقطه و متأثر از تراست‌های اصلی منطقه، دچار شکست شیب آشکاری شده‌است. اما، گرادیان طولی نیمرخ آبراهه اصلی جگین به‌طور آشکار با چهار مورد دیگر، متفاوت است. علاوه بر میزان تقعر پایین‌تر (C_T = 29.89%)، منحنی نیمرخ در بخش بالادست با حالت خطیِ متمایل به مقعر شروع‌شده و تقریباً در حدود یک سوم طول مسیر خود که بر ارتفاعات مکران داخلی و بیرونی انطباق دارد، تحت تأثیر ساختارهای لیتولوژیکی و زمین‌ساختی (به‌ویژه تراست‌های قصرقند و چاه‌خان)، در حالت تقعر اما با شیب نسبتاً یکنواخت و به خط مستقیم جریان یافته است. سپس، از تراست چاه‌خان به‌سوی پایین‌دست، با شکست شیب ایجادشده، گرادیان طولی و میزان تقعر آن افزایش چشمگیری نشان می‌دهد. حداکثر میزان تقعر، در این بخش از منحنی و منطبق بر واحد مکران ساحلی به‌ثبت رسیده‌است (شکل۸).



شکل ۸- نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده برای آبراهه‌های اصلی حوضه‌های پنج‌گانه

Fig. 8. Normalized longitudinal profiles for the main streams in the study basins.

نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده در آبراهه‌های فرعی

همانند آبراهه‌های اصلی، منحنی بیشتر نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده مستخرج برای آبراهه‌های فرعی نیز، به صورت مقعر با دامنهٔ نوسانی نسبتاً بالا می‌باشند (شکل ۱۰). بالاترین میزان شاخص C_T، به ترتیب در آبراهه‌های B5 (C_T = 62.72%)، B6 (C_T = 64.39%) و K4 (C_T = 52.57%) مشاهده می‌شود. اما، پایین‌ترین میزان آن، به‌ترتیب در نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده آبراهه‌های J1 (C_T = 1.38%)، J3 (C_T = 2.64%) و B1 (C_T = 12.21%) ثبت شده‌اند (جدول۱). در این بین، نیمرخ‌های طولی در آبراهه‌های J1 و B7 (C_T = -11.36%) به ترتیب به عنوان خطی‌ترین و محدب‌ترین نیمرخ، به زیرحوضه‌های کوچک با مساحت کم مربوط می‌شوند، به طوری که عمدتاً در بخش سرچشمه و یا مناطق بالادست حوضه‌های اصلی واقع شده‌اند. این نیمرخ‌ها، غالباً به ارتفاعات بالادست و شمالی‌ترین بخش‌های رشته کوه‌های مکران در حوضه‌های جگین و باهوکلات و نیز تأثیر فراخاستِ زمین‌ساختی ناشی از عملکرد گسل‌های تراستی در این مناطق، مربوط می‌شوند. این یافته‌ها با نتایج به دست آمده توسط پرز-پنا و همکاران (Pérez-Peña et al., 2017) در آبراهه‌های واقع‌در دامنه‌های رشته کوه‌های سِ یرا الهامیلا[1] در اسپانیا، همخوانی کامل و بالایی را نشان می‌دهد. به طور کلی، در بیشتر آبراهه‌های فرعی منتخبِ بررسی‌شده، صرف‌نظر از اینکه گرادیان نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده در چه حالتی از تعادل قرار دارند، نقاط شکست شیب در منحنی نیمرخ‌ها (برای مثال، به‌طور ویژه در K3, S1, S3, G2, G5, B6) در ارتباط با نقش و تأثیر عملکرد گسل‌های متعدد، کاملاً آشکار و برجسته شده‌اند (شکل۹ و شکل۱۰).

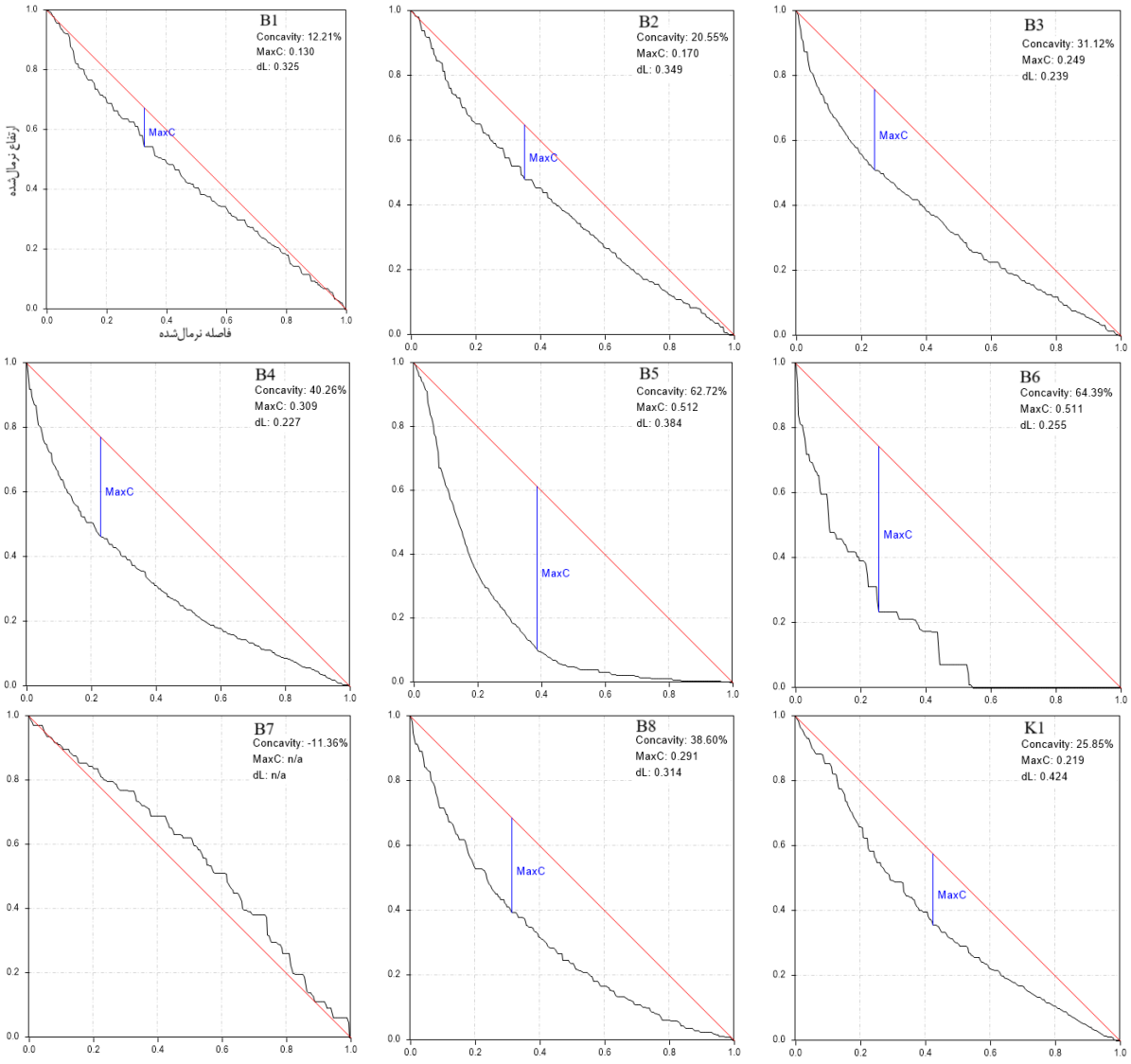
1- Sierra Alhamilla

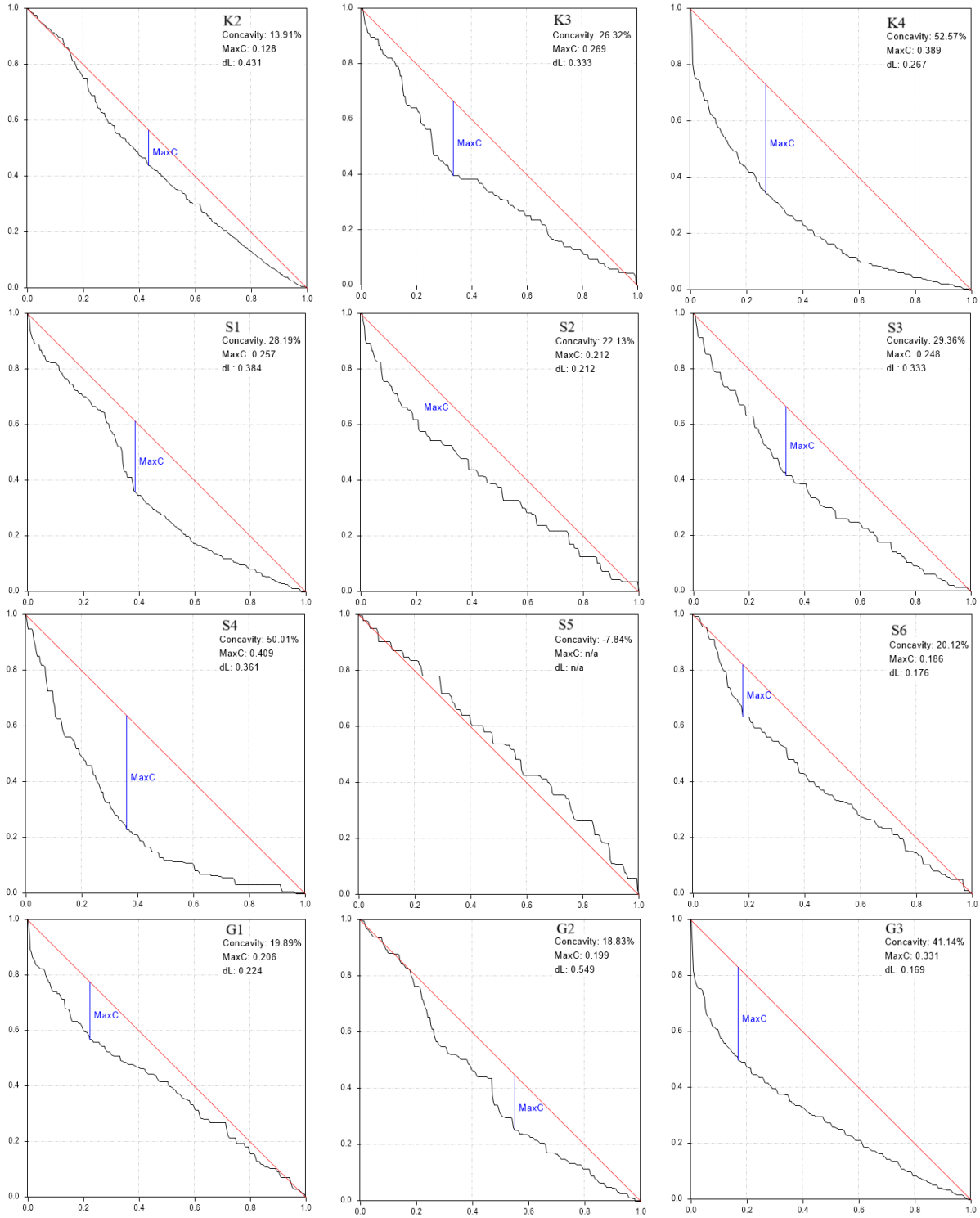


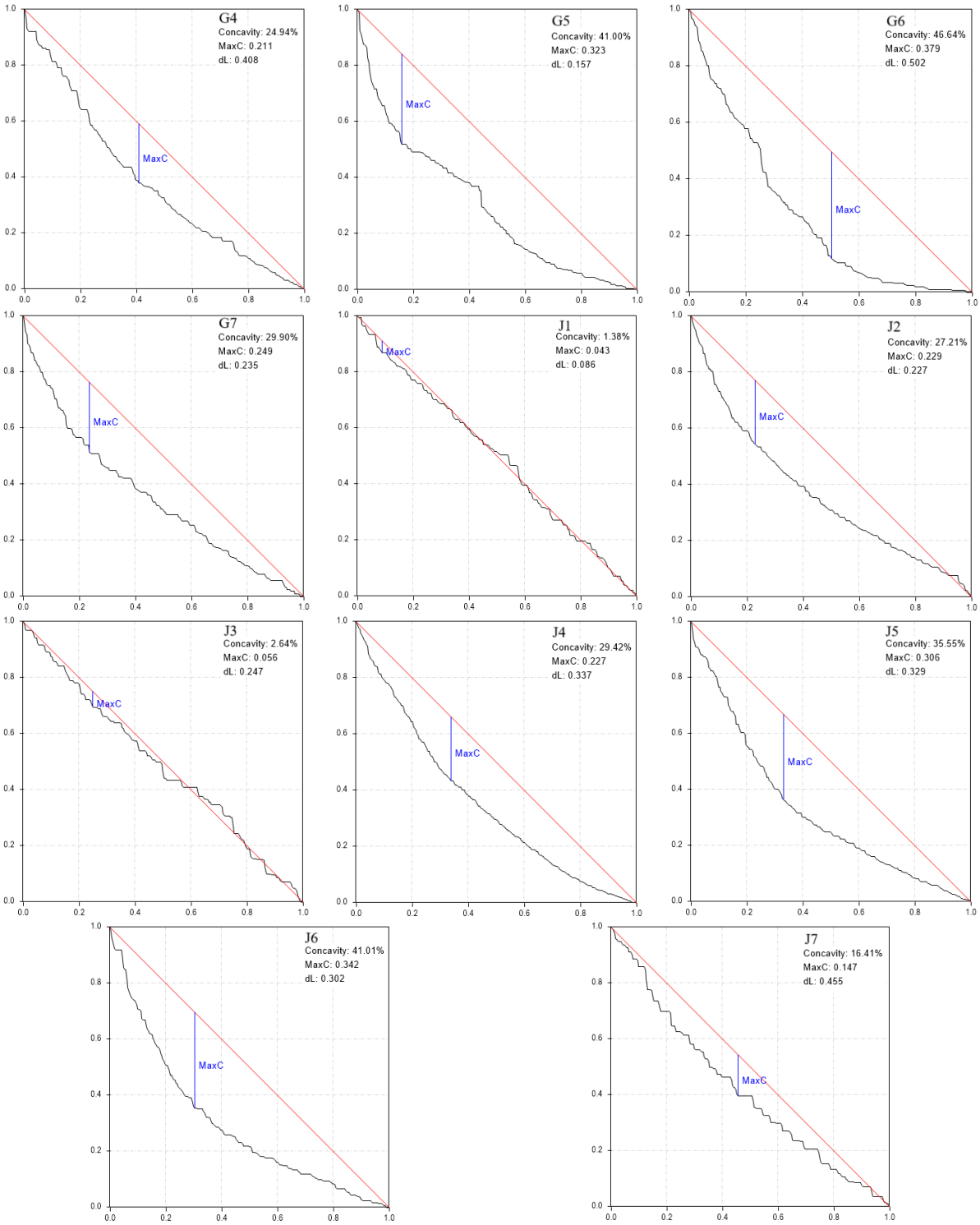
شکل ۹– نمونه‌هایی از نقاط شکست ایجادشده در مسیر رودهای موردمطالعه. الف) در حوضه کهیر، ب) در حوضه سدیچ .

Fig. 9. Examples of knickpoints formed along the studied streams. A) in the Kahir basin, and B) in the Sedich basin.

همان‌طور که پیش‌تر اشـاره شـد، نیمرخ طولی در بیشـتر آبراهه‌های فرعی منطقه مورد مطالعه، حالت مقعر دارند؛ اما، در میان آن‌ها تنها آبراهه‌های B7 (C_T = -11.36%) و S5 (C_T = -7.84%) دارای نیمرخ محدب، آبراهه‌های J1 (C_T = 1.38%) و J3 (C_T = 2.64%) به عنوان خطی‌ترین نیمرخ و چهار آبراهه (B1, K2, J7, B2 در شـکل ۱۰) نیز به صـورت نسـبتاً خطی و مسـتقیم قابل مشاهده هستند. نیمرخ آبراهه J1 که خطی‌ترین نمونهٔ ثبت‌شده در منطقهٔ مورد مطالعه می‌باشد، در بیشـتر طول مسیر کوتاه خود که در واحد مکران داخلی جریان‌یافته، به‌شـدت تحت تأثیر گسـل‌های فراوان نرمال و معکوس قرار گرفته اسـت. این آبراهه در حد فاصـل سـرچشـمه و دهانه (محل اتصـال به آبراهه اصـلی) از تراسـت‌های اصـلی منطقه به ترتیب بشـاگرد و قصـرقند (در محل با نام پاشـگیرم) متاثرشـده؛ به‌گونه‌ای‌که، C_{Max} در این نیمرخ در پایین‌دسـت تراسـت بشـاگرد و منطبق بر واحد لیتولوژیکی Q^{t1} رخ داده‌است. این نیمرخ، به‌طور آشکار و چشمگیری، تأثیر و اهمیت متغیرهای زمین‌ساختی و لیتولوژیکی را نشان می‌دهد. زیرا، فراز و فرودهای آن در انطباق کامل با خط گسـل‌ها، تنوع و تغییر در واحدهای لیتولوژیکی (رسـوبی، آذرین، آمیزه‌های رنگین– مجموعه دورکان، واحد گوردک) منطقه می‌باشـد. همچنین، نیمرخ آبراهه B7 (منطبق بر آبراهه پیشـامگ) به عنوان محدب‌ترین نیمرخ، با جریان یافتن در بخش جنوبی واحد مکران داخلی، علاوه بر واقع شدن با فاصله کم در شمال تراست قصرقند، تحت‌تأثیر گسل‌های معکوس پیشامگ و مورتان نیز قرار گرفته‌است. این نیمرخ، به‌روشنی نشان می‌دهد که این بخش از منطقه (زیرحوضه مربوطه) در واکنش به تداوم فراخاست زمین‌ساختی ناشی از فعالیت تراست قصرقند و دیگر گسل‌های معکوس، در حالت گذار بوده و موج برش و فرسایش آن بر ناهمواری منطقه در جریان است. نیمرخ آبراهه S1 را می‌توان به‌طور مشخص به دو بخش متفاوت بالا و پایین که به‌ترتیب در واحد مکران داخلی و بیرونی جریان‌یافته، تقسیم کرد (شکل ۱۰). همان‌طور که این نیمرخ نشان می‌دهد، براثر فعالیت تراست قصرقند (امتداد آن در محل با نام پاشگیرم)، شکست شیب قابل‌توجهی در منحنی آن رخ‌داده و با ثبت حداکثر تقعر (C_{Max})، شاخص تقعر آن معنادار شده است.


B1
Concavity: 12.21%
MaxC: 0.130
dL: 0.325
B2
Concavity: 20.55%
MaxC: 0.170
dL: 0.349
B3
Concavity: 31.12%
MaxC: 0.249
dL: 0.239
B4
Concavity: 40.26%
MaxC: 0.309
dL: 0.227
B5
Concavity: 62.72%
MaxC: 0.512
dL: 0.384
B6
Concavity: 64.39%
MaxC: 0.511
dL: 0.255
B7
Concavity: -11.36%
MaxC: n/a
dL: n/a
B8
Concavity: 38.60%
MaxC: 0.291
dL: 0.314
K1
Concavity: 25.85%
MaxC: 0.219
dL: 0.424
MaxC
ارتفاع نرمال‌شده
فاصله نرمال‌شده


K2
Concavity: 13.91%
MaxC: 0.128
dL: 0.431
K3
Concavity: 26.32%
MaxC: 0.269
dL: 0.333
K4
Concavity: 52.57%
MaxC: 0.389
dL: 0.267
S1
Concavity: 28.19%
MaxC: 0.257
dL: 0.384
S2
Concavity: 22.13%
MaxC: 0.212
dL: 0.212
S3
Concavity: 29.36%
MaxC: 0.248
dL: 0.333
S4
Concavity: 50.01%
MaxC: 0.409
dL: 0.361
S5
Concavity: -7.84%
MaxC: n/a
dL: n/a
S6
Concavity: 20.12%
MaxC: 0.186
dL: 0.176
G1
Concavity: 19.89%
MaxC: 0.206
dL: 0.224
G2
Concavity: 18.83%
MaxC: 0.199
dL: 0.549
G3
Concavity: 41.14%
MaxC: 0.331
dL: 0.169
MaxC



شکل ۱۰- نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده برای آبراهه‌های فرعی در حوضه‌های پنج‌گانه (B: باهوکلات، K: کهیر، S: سدیچ، G: گابریک، J: جگین). برای آگاهی از موقعیت مکانی، به شکل ۳ مراجعه کنید.

Fig. 10. Normalized longitudinal profiles for secondary streams in the five basins studied (B: Bahukalat, K: Kahir, S: Sedich, G: Gabrik, J: Jagin). See fig.3 for location information**.**

نتیجه‌گیری

نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده رودخانه، امکان مقایسه تغییرات گرادیان رودخانه‌های گوناگون را فراهم می‌کنند که ممکن است تحت‌تأثیر فاکتورهای کنترل‌گر آب و هوایی، سنگ‌شناسی و یا زمین‌ساختی باشند. در این مطالعه، با به کارگیری افزونه NProfiler و مبتنی بر داده‌های DEM در محیط ArcGIS 10.8، به بررسی و شناسایی الگوهای واکنش آبراهه‌های منتخب در پنج حوضه آبریز اصلی– باهوکلات، کهیر، سدیج، گابریک و جگین، واقع‌در بخش ایرانی منشور بَرافزایشی مکران پرداخته شد.

به طور کلی، نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده نسبت به نیمرخ‌های طولی سنتی، تفسیر آسان‌تری دارند و نقاط شکست شیب در طول نیمرخ رودخانه‌ها را به‌نحو بارزتری، برجسته‌تر می‌کنند. در این مطالعه، همه نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده برای آبراهه‌های اصلی (شکل۸) و بیشتر نیمرخ‌های نرمال شده در آبراهه‌های فرعی (شکل۱۰)، درصد نسبتاً بالایی از میزان تقعر را که نشان‌دهنده وجود چشم‌اندازی فرسوده و فرسایش‌یافته است، را نشان می‌دهند. به عبارت دیگر، نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده با حالت مقعر نشان‌دهندهٔ وجود یک حالت نسبی از تعادل در نیمرخ رودخانه‌ها هستند؛ زیرا پس از فراخاست زمین‌ساختیِ ارتفاعات مکران، در ارتباط با عناصر آب و هوایی و نیز لیتولوژی حساس به فرسایش– که به طور ویژه بر واحد مکران ساحلی نیز منطبق است، با غلبه موج برش عمقی و فرسایش شبکه زهکشی، نیمرخ‌های طولی به سطحی از پایداری و آرامش نسبی رسیده‌اند. همچنین، بررسی نیمرخ‌های ترسیم شده نشان داد، نیمرخ‌های نسبتاً خطی و مستقیم و حتی محدب، مربوط به آبراهه‌های واقع‌در بخش سرچشمه حوضه‌ها می‌باشند. این‌گونه نیمرخ‌ها هر چند به طور محدود در منطقه یافت می‌شوند، اما ارتباط و تأثیرپذیری زیرحوضه‌های کوچک با مساحت پایین از گسل‌های فراوان (به‌ویژه تراست‌های اصلی) منطقه و نیز تنوع لیتولوژیکی ارتفاعات مکران، را نشان می‌دهند. بنابراین، به‌روشنی نشان می‌دهند که آبراهه‌ها در این مناطق (مناطق بالادست حوضه‌های باهوکلات و جگین)، در حالت گذار هستند. در پایان شایان گفتن است، به‌کارگیری افزونه NProfiler در محیط نرم‌افزار ArcGIS، علاوه بر اینکه تحلیل و تفسیر نیمرخ‌های طولی رودخانه مبتنی بر مدل‌های دیجیتالی ارتفاع را به‌روشی ساده، سریع و کارآمد فراهم نمودند؛ در زمینه شناخت و تفسیر الگوهای واکنش رودخانه‌ها نسبت به عوامل کنترل‌کننده درونی– زمین‌ساخت و بیرونی– سنگ‌شناسی، تغییرات آب و هوایی و فرسایش ناشی از آن‌ها، کمک شایانی نمودند. بنابراین، تحلیل‌های سریعِ انجام‌شده در این مطالعه، توانایی، سودمندی و کاربردی بودن نیمرخ‌های طولی نرمال‌شده رودخانه را به طور ویژه، برجسته کرد.

سپاسگزاری

بر خود لازم می‌دانیم از سه داور گرامی که با نظرات و پیشنهادات ارزشمند خویش باعث بهبود کیفیت و افزایش غنای متن شدند، سپاسگزاری نمائیم.

References

Alaei-Taleghani, M. (2007). *Geomorphology of Iran*. Tehran: Ghoomes Publishing. [In Persian]

Antón, L., De Vicente, G., Muñoz-Martín, A., & Stokes, M. (2014). Using river long profiles and geomorphic indices to evaluate the geomorphological signature of continental scale drainage capture, Duero basin (NW Iberia). *Geomorphology*, *206*, 250-261. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.09.028

Azañón, J. M., Galve, J. P., Pérez-Peña, J. V., Giaconia, F., Carvajal, R., Booth-Rea, G., ... & Roldán, F. J. (2015). Relief and drainage evolution during the exhumation of the Sierra Nevada (SE Spain): Is denudation keeping pace with uplift? *Tectonophysics, 663*, 19–32. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.06.015

Barbero, E., Delavari, M., Dolati, A., Saccani, E., Marroni, M., Catanzariti, R., & Pandolfi, L. (2020a). The Ganj Complex reinterpreted as a Late Cretaceous volcanic arc: Implications for the geodynamic evolution of the North Makran domain (southeast Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, *195*, 104306. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104306

Barbero, E., Delavari, M., Dolati, A., Vahedi, L., Langone, A., Marroni, M., ... & Saccani, E. (2020b). Early Cretaceous Plume–Ridge Interaction Recorded in the Band-e-Zeyarat Ophiolite (North Makran, Iran): new constraints from petrological, mineral chemistry, and geochronological data. *Minerals*, *10*(12), 1100. https://doi.org/10.3390/min10121100

Barbero, E., Di Rosa, M., Pandolfi, L., Delavari, M., Dolati, A., Zaccarini, F., ... & Marroni, M. (2023). Deformation history and processes during accretion of seamounts in subduction zones: the example of the Durkan Complex (Makran, SE Iran). *Geoscience Frontiers*, *14*(2), 101522. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2022.101522

Barbero, E., Pandolfi, L., Delavari, M., Dolati, A., Saccani, E., Catanzariti, R., ... & Marroni, M. (2021). The western Durkan Complex (Makran Accretionary Prism, SE Iran): A Late Cretaceous tectonically disrupted seamounts chain and its role in controlling deformation style. *Geoscience Frontiers*, *12*(3), 101106-1. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.12.001

Barbero, E., Pandolfi, L., Delavari, M., Dolati, A., Saccani, E., Di Rosa, M., & Marroni, M. (2025). A review of Mesozoic geodynamic evolution of the North Makran (SE Iran): A tale of a Neo-Tethyan ocean vanished due to two coexisting subduction zones. *Gondwana Research*, *141*, 74–101. https://doi.org/10.1016/j.gr.2025.01.016

Bayer, R., Chery, J., Tatar, M., Vernant, P., Abbassi, M., Masson, F., ... & Bellier, O. (2006). Active deformation in Zagros—Makran transition zone inferred from GPS measurements. *Geophysical Journal International*, *165*(1), 373-381. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02879.x

Brookfield, M. E. (1998). The evolution of the great river systems of southern Asia during the Cenozoic India-Asia collision: rivers draining southwards. *Geomorphology*, *22*(3-4), 285-312. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00082-2

Brookfield, M. E. (2008). Evolution of the great river systems of southern Asia during the Cenozoic India–Asia collision: Rivers draining north from the Pamir syntaxis. *Geomorphology*, *100*(3-4), 296-311. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.01.003

Burbank, D. W., & Anderson, R. S. (2012). *Tectonic geomorphology* (2nd ed.). Chichester: Wiley-Blackwell. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781444345063

Burg, J. P. (2018). Geology of the onshore Makran accretionary wedge: Synthesis and tectonic interpretation. *Earth-Science Reviews*, *185*, 1210–1231. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.09.011

Burg, J. P., Dolati, A., Bernoulli, D., & Smith, J. (2013). Structural style of the Makran tertiary accretionary complex in SE Iran. In *Lithosphere Dynamics and Sedimentary Basins: The Arabian Plate and Analogues*, Frontiers in Earth Sciences, Al Hosani, K., Roure, F., Ellison, R., Lokier, S., (Eds), Springer: Heidelberg, Germany, pp. 239–259. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30609-9_12

Byrne, D. E., Sykes, L. R., & Davis, D. M. (1992). Great thrust earthquakes and aseismic slip along the plate boundary of the Makran subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *97*(B1), 449-478. https://doi.org/10.1029/91JB02165

Castillo, M., Bishop, P., & Jansen, J. D. (2013). Knickpoint retreat and transient bedrock channel morphology triggered by base-level fall in small bedrock river catchments: The case of the Isle of Jura, Scotland. *Geomorphology*, *180*, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.023

Demoulin, A. (1998). Testing the tectonic significance of some parameters of longitudinal river profiles: the case of the Ardenne (Belgium, NW Europe). *Geomorphology*, *24*(2-3), 189-208. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00016-6

Dolati, A. (2010). *Stratigraphy, structure, geology, and low-temperature thermochronology across the Makran accretionary wedge in Iran*. (Ph.D. Thesis), ETH Zurich. https://doi.org/10.3929/ethz-a-006226348

Dolati, A., & Burg, J. P. (2013). Preliminary fault analysis and paleostress evolution in the Makran Fold-and-Thrust Belt in Iran. In *Lithosphere dynamics and sedimentary basins: The Arabian Plate and analogues* (pp. 261-277). Berlin: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30609-9_13

Giaconia, F., Booth-Rea, G., Martínez-Martínez, J. M., Azañón, J. M., Pérez-Peña, J. V., Pérez-Romero, J., & Villegas, I. (2012). Geomorphic evidence of active tectonics in the Sierra Alhamilla (eastern Betics, SE Spain). *Geomorphology*, *145*, 90-106. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.043

Goldrick, G., & Bishop, P. (2007). Regional analysis of bedrock stream long profiles: evaluation of Hack's SL form, and formulation and assessment of an alternative (the DS form). *Earth Surface Processes and Landforms*, *32*(5), 649-671. https://doi.org/10.1002/esp.1413

Grohmann, C. H., Riccomini, C., & Alves, F. M. (2007). SRTM-based morphotectonic analysis of the Poços de Caldas Alkaline Massif, southeastern Brazil. *Computers & Geosciences*, *33*(1), 10-19. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.05.002

Hack, J. T. (1957). *Studies of longitudinal profiles in Virginia and Maryland* (Vol. 294). Washington DC: US Government Printing Office. https://doi.org/10.3133/pp294B

Irandoust, M. A., Priestley, K., & Sobouti, F. (2022). High-resolution lithospheric structure of the Zagros collision zone and Iranian Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *127*(11), e2022JB025009. https://doi.org/10.1029/2022JB025009

Jackson, J., Norris, R., & Youngson, J. (1996). The structural evolution of active fault and fold systems in central Otago, New Zealand: evidence revealed by drainage patterns. *Journal of Structural Geology*, *18*(2-3), 217-234. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(96)80046-0

Keller, E. A., & Pinter, N. (2002). *Active Tectonics Earthquake, Uplift, and Landscape* (2nd Ed.). New Jersey: Prentice Hall Publisher.

Kirby, E., & Whipple, K. (2001). Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. *Geology*, *29*(5), 415-418. https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029%3C0415:QDRURV%3E2.0.CO;2

Kirby, E., & Whipple, K. X. (2012). Expression of active tectonics in erosional landscapes. *Journal of Structural Geology*, *44*, 54-75. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.07.009

Kopp, C., Fruehn, J., Flueh, E. R., Reichert, C., Kukowski, N., Bialas, J., & Klaeschen, D. (2000). Structure of the Makran subduction zone from wide-angle and reflection seismic data. *Tectonophysics*, *329*(1-4), 171-191. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00195-5

Mackin, J. H. (1948). Concept of the graded river. *Geological Society of America Bulletin*, *59*(5), 463-512. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1948)59[463:COTGR]2.0.CO;2

Matoš, B., Tomljenović, B., & Trenc, N. (2014). Identification of tectonically active areas using DEM: a quantitative morphometric analysis of Mt. Medvednica, NW Croatia. *Geological Quarterly*, *58*(1), 51-70. https://doi.org/10.7306/gq.1130

McCall, G. J. H., & Kidd, R. G. W. (1982). The Makran, Southeastern Iran: the anatomy of a convergent plate margin active from Cretaceous to Present. *Geological Society, London, Special Publications*, *10*(1), 387-397. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1982.010.01.26

Mohammadi, A., Burg, J. P., Winkler, W., Ruh, J., & Von Quadt, A. (2016). Detrital zircon and provenance analysis of Late Cretaceous–Miocene onshore Iranian Makran strata: Implications for the tectonic setting. *Bulletin*, *128*(9-10), 1481-1499. https://doi.org/10.1130/B31361.1

Molin, P., Pazzaglia, F. J., & Dramis, F. (2004). Geomorphic expression of active tectonics in a rapidly-deforming forearc, Sila massif, Calabria, southern Italy. *American Journal of Science*, *304*(7), 559-589. https://doi.org/10.2475/ajs.304.7.559

Penney, C., Copley, A., & Oveisi, B. (2015). Subduction tractions and vertical axis rotations in the Zagros–Makran transition zone, SE Iran: The 2013 May 11 M w 6.1 Minab earthquake. *Geophysical Journal International*, *202*(2), 1122-1136. https://doi.org/10.1093/gji/ggv202

Pérez-Peña, J. V., Al-Awabdeh, M., Azañón, J. M., Galve, J. P., Booth-Rea, G., & Notti, D. (2017). SwathProfiler and NProfiler: Two new ArcGIS Add-ins for the automatic extraction of swath and normalized river profiles. *Computers & Geosciences*, *104*, 135-150. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.08.008

Pérez-Peña, J. V., Azañón, J. M., & Azor, A. (2009a). CalHypso: An ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain. *Computers & Geosciences*, *35*(6), 1214-1223. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.06.006

Pérez-Peña, J. V., Azañón, J. M., Azor, A., Delgado, J., & González-Lodeiro, F. (2009b). Spatial analysis of stream power using GIS: SLk anomaly maps. *Earth Surface Processes and Landforms*, *34*(1), 16-25. https://doi.org/10.1002/esp.1684

Pérez-Peña, J. V., Azor, A., Azañón, J. M., & Keller, E. A. (2010). Active tectonics in the Sierra Nevada (Betic Cordillera, SE Spain): Insights from geomorphic indexes and drainage pattern analysis. *Geomorphology*, *119*(1-2), 74-87. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.020

Priestley, K., Sobouti, F., Mokhtarzadeh, R. A., Irandoust, M., Ghods, R., Motaghi, K., & Ho, T. (2022). New constraints for the on-shore Makran subduction zone crustal structure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *127*(1), e2021JB022942. https://doi.org/10.1029/2021JB022942

Rigon, R., Rodriguez-Iturbe, I., Maritan, A., Giacometti, A., Tarboton, D. G., & Rinaldo, A. (1996). On Hack's law. *Water Resources Research*, *32*(11), 3367-3374. https://doi.org/10.1029/96WR02397

Royden, L., & Taylor Perron, J. (2013). Solutions of the stream power equation and application to the evolution of river longitudinal profiles. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *118*(2), 497-518. https://doi.org/10.1002/jgrf.20031

Ruszkiczay-Rüdiger, Z., Fodor, L., Horváth, E., & Telbisz, T. (2009). Discrimination of fluvial, eolian and neotectonic features in a low hilly landscape: A DEM-based morphotectonic analysis in the Central Pannonian Basin, Hungary. *Geomorphology*, *104*(3-4), 203-217. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.014

Scotti, V. N., Molin, P., Faccenna, C., Soligo, M., & Casas-Sainz, A. (2014). The influence of surface and tectonic processes on landscape evolution of the Iberian Chain (Spain): Quantitative geomorphological analysis and geochronology. *Geomorphology*, *206*, 37-57. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.09.017

Seeber, L., & Gornitz, V. (1983). River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. *Tectonophysics*, *92*(4), 335-367. https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90201-9

Stöcklin, J. (1968). Structural history and tectonics of Iran: a review. *AAPG Bulletin*, *52*(7), 1229-1258. https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D

Troiani, F., Galve, J. P., Piacentini, D., Della Seta, M., & Guerrero, J. (2014). Spatial analysis of stream length-gradient (SL) index for detecting hillslope processes: a case of the Gállego River headwaters (Central Pyrenees, Spain). *Geomorphology*, *214*, 183-197. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.004

Whipple, K. X., & Tucker, G. E. (1999). Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *104*(B8), 17661-17674. https://doi.org/10.1029/1999JB900120

Willett, S. D., McCoy, S. W., Taylor Perron, J., Goren, L., & Chen, C. Y. (2014). Dynamic reorganization of river basins. *Science*, *343*(6175), 1248765. https://doi.org/10.1126/science.1248765

Wobus, C., Whipple, K. X., Kirby, E., Snyder, N., Johnson, J., Spyropolou, K., ... & Sheehan, D. (2006). Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls. In: *Tectonics, Climate and Landscape Evolution.* Willett, S.D., Hovius, N., Brandon, M.T., Fisher, D.M. (Eds.), Geology Society of America Special Papers, 55–74. https://doi.org/10.1130/2006.2398(04)

Yamani, M. (1998). The Comparison of Change Direction of River on Deltas of East Makran Coastal Plain Surface. *Geographical Researches*, *35*, 34-56. [In Persian] https://journals.ut.ac.ir/article_17220_34.html

Zelenin, E., Bachmanov, D., Garipova, S., Trifonov, V., & Kozhu-rin, A. (2022). The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): The Ontology and Design behind the Continental-Scale Dataset. *Earth System Science Data*, *14*(10), 4489-4503. https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022

Zhang, H. P., Zhang, P. Z., Kirby, E., Yin, J. H., Liu, C. R., & Yu, G. H. (2011). Along-strike topographic variation of the Longmen Shan and its significance for landscape evolution along the eastern Tibetan Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, *40*(4), 855-864. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.05.015

Vol. 15, No. 1, Spring 2026, P. 47-71 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.95694.1611 OPEN ACCESS

Assessment of Geomorphological Quality of the Nirchai River in Ardabil Province Using the MQI Method

Behrouz Nezafat Takleh [1], Fariba Esfandyari [1*], Raoof Mostafazadeh [2], Mousa Abedini [1]

[1] Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
[2] Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 29 September 2025

Revised: 24 October 2025

Accepted: 28 November 2025

Available Online:

29 November 2025

Keywords:

Morphological Quality Index (MQI)

River Geomorphology

Morphological Stability

Hydromorphological Assessment

Anthropogenic Pressure

ABSTRACT

The aim of this study is to assess the geomorphological quality of the Nirchai River in Ardabil Province. To achieve this objective, the Morphological Quality Index (MQI), which is based on functional and artificial factors and is used to evaluate the condition and morphological stability of river systems, was employed. First, the river network was divided into six homogeneous reaches based on total channel length and the geomorphic quality index method. Subsequently, the relevant morphological indicators, including bank stability, channel pattern, cross-sectional changes, sedimentation potential, and compatibility with the surrounding environment, were calculated. The MQI criteria consist of thirteen functional indicators and twelve artificial indicators. According to the results, the MQI of the Nirchai River effectively reflects the geomorphological conditions. Reach 2, with an excellent score of 0.85, falls within the very good class, indicating its morphological stability due to minimal human intervention. In the following ranks, Reach 4 (0.54) and Reach 3 (0.62) fall into the moderate class. Ultimately, Reach 6, with the lowest score (0.43), is classified as having very poor quality, which is directly attributed to excessive human interventions and extensive artificial alterations to the river channel as a result of urban development in Nir. Therefore, it is concluded that Reach 2, with the highest score, has the best geomorphological quality and greater morphological stability compared to the other reaches, whereas Reach 6, with the lowest score, represents the poorest condition. Finally, it is recommended that future studies evaluate temporal changes in the MQI of the Nirchai River using satellite data.

* Corresponding author: Fariba Esfandyari E-mail address: Esfandyari@uma.ac.ir

How to cite this article: Nezafat Takleh, B., Esfandyari, F., Mostafazadeh, R., & Abedini, M. (2026). Assessment of Geomorphological Quality of the Nirchai River in Ardabil Province Using the MQI Method. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 15*(1), 47-71. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.95694.1611

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

River flow regimes are among the most fundamental drivers of river evolution. Beyond their roles in runoff conveyance and sediment transport, rivers provide essential ecological functions by supporting aquatic habitats, interacting laterally with riparian ecosystems, and forming longitudinal corridors that connect terrestrial and marine environments (Downs & Gregory, 2014).

The necessity of investigating the Nirchai River arises from the increasing hydromorphological pressures imposed on this river system as a result of land-use changes, excessive substrate extraction from the riverbed, and recent climatic transformations. These pressures have contributed to the degradation of channel morphology, intensification of bank erosion, and progressive deterioration of riparian ecosystems. Despite its environmental and socio-economic importance, the Nirchai River has not previously been evaluated using a standardized geomorphological assessment framework.

Accordingly, the application of the Geomorphological Quality Index (MQI) a quantitative and standardized method for assessing river morphological quality and stability is particularly warranted. The present study represents the first application of the MQI method to the Nirchai River, with the primary objective of evaluating its geomorphological quality and identifying reaches most affected by human intervention.

Material and Methods

In terms of research design, this study is descriptive–analytical and, with respect to its objectives, constitutes applied research. Primary data were collected through comprehensive library studies and detailed field surveys conducted along the course of the Nirchai River. Initially, geomorphic data (including topographic and geomorphological maps and aerial imagery), geological information, climatic records, and hydrological data such as discharge statistics from the Nirchai hydrometric station and information on tributaries and water resources were compiled to define reference conditions and establish the core components required for MQI calculation. Subsequently, anthropogenic pressures and engineering structures along the riverbanks were systematically documented.

Spatial analyses and extraction of geometric parameters were carried out using ArcGIS and Google Earth imagery. Quantitative calculations of the Geomorphological Quality Index (MQI) and the associated Pressure Index (IP**)**, along with statistical processing of the results, were performed using Microsoft Excel**.** The MQI method applied in this study is based on a set of functional (F1–F11) and artificial (A1–A12) indicators, which collectively quantify the morphological status and stability of the river system.

Results and Discussion

Analysis of Index Data Across Different River Reaches

In light of the results presented in Table 3, the data pertaining to the scores of various indices across diverse reaches provide a robust opportunity to investigate the trend of performance changes and to identify the factors influencing the improvement or degradation of performance quality. This analysis is predicated upon data collected from six distinct reaches, with scores assigned to indices ranging from F1 to A12, ultimately leading to the derivation of the Geomorphological Quality Index (MQI).

Descriptive Analysis and Overall Data Trend

The aggregate score across all questionnaire items has increased from 53 in the initial reache to 82 in the sixth reache. This ascending trend signifies an overall improvement in the collective performance of the indices over time. Similarly, the total score for Class C criteria has advanced from 37 to 57, corroborating the positive trajectory in the overall quality index.

Index fluctuations across the reaches are varied; certain indices, notably A3 and A10, have maintained consistently high and stable scores across all periods, indicating sustained optimal performance. Conversely, indices such as F11 and F12 experienced a noticeable score decrement in the latter reaches, necessitating more rigorous investigation and follow-up.

Temporal Trend Analysis and Index Variation

An examination of the score variations across the time intervals reveals that a number of indices exhibited a statistically significant upward trend. For instance, index F7 increased from a score of zero in the first reach to five in subsequent reach, denoting substantial amelioration. Furthermore, key indices within Group A, particularly A3 and A10, have consistently attained high scores, positioning them as pivotal determinants of the Geomorphological Quality Index. This escalating trend suggests the positive impact of implemented interventions or favorable environmental factors on index quality enhancement, thereby guiding the development of future planning strategies.

Correlation Analysis with Overall Performance

A correlation assessment between the scores of each individual index and the total score of all questions, as well as Class C, demonstrated that specific indicesnamely A3, A10 and F7 exhibit a strong positive correlation with overall performance. These indices play a pivotal role in the comprehensive performance enhancement, and focused attention on them can significantly amplify the efficacy of upgrading programs.

Index Classification and Cluster Analysis

The classification of indices based on their functional attributes and temporal variations enables the identification of groups sharing analogous characteristics. Cluster analysis revealed three distinct groupings: one cluster comprised indices with high performance and an increasing trend (e.g., A3, A10, and F7); a second cluster consisted of indices with moderate scores and limited fluctuation; and the third cluster was composed of indices demonstrating low performance or severe volatility.

Summary of Scores and Geomorphological Assessment of Nirchai River Reaches

As presented in Table 4, Reach 2 records the highest MQI coefficient (0.85) and is classified in the "very good" category, indicating the highest level of geomorphological quality and morphological stability among the studied reaches. Reaches 1 and 6**,** both with a coefficient of 0.43**,** fall within the poor to very poor category, reflecting intense human interference and extensive artificial alterations. Reach 5**,** with a coefficient of 0.75**,** is classified as good**,** while Reaches 3 and 4 occupy an average quality class.

Conclusion

This study provides a comprehensive assessment of the geomorphological quality and morphological stability of the Nirchai River using the Geomorphological Quality Index (MQI)**.** The results derived from field observations and satellite imagery indicate that Reach 2, with an MQI value of 0.85, exhibits the highest morphological stability and is categorized as having very good geomorphological quality. In contrast, reaches 1 and 6, with MQI values of 0.43, are classified as poor, reflecting substantial human intervention within the river channel and adjacent areas.

These anthropogenic disturbances contribute to increased sediment production, channel instability, and accelerated erosion processes. The findings emphasize the necessity of implementing targeted river management and restoration strategies, particularly in reaches experiencing severe human pressure, to improve geomorphological conditions and ensure the long-term stability of the Nirchai River system.

جلد ۱۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۷۱-۴۷ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.95694.1611 دسترسی آزاد

ارزیابی کیفیت ژئومورفولوژیکی رودخانهٔ نیرچای استان اردبیل با استفاده از روش MQI

بهروز نظافت تکله[۱]، فریبا اسفندیاری درآباد[۱*]، رئوف مصطفی زاده[۲]، موسی عابدینی[۱]

[۱] گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
[۲] گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۷

کلمات کلیدی:

شاخص کیفیت ژئومورفولوژیکی (MQI)

ژئومورفولوژی رودخانه

پایداری مورفولوژیکی

ارزیابی هیدرومورفولوژیکی

مداخلات انسانی

چکیده

هدف از این پژوهش، ارزیابی کیفیت ژئومورفولوژیکی رودخانهٔ نیرچای در استان اردبیل است. به منظور دستیابی به این هدف، از روش شاخص کیفیت ژئومورفولوژیکی (MQI)، که مبتنی بر فاکتورهای عملکردی و مصنوعی است و برای سنجش وضعیت و پایداری مورفولوژیکی رودخانه‌ها به‌کار می‌رود استفاده شده است. ابتدا شبکهٔ رودخانه بر اساس طول کلی و هم‌چنین روش شاخص کیفیت ژئومورفیک به شش بازهٔ همگن تقسیم می‌شود. سپس شاخص‌های مورفولوژیکی مرتبط نظیر پایداری کرانه، الگوی کانال، تغییرات مقاطع عرضی، پتانسیل رسوب‌گذاری و سازگاری با محیط پیرامونی محاسبه می‌شوند. معیارهای شاخص کیفیت ژئومورفولوژیک، از سیزده شاخص عملکردی و دوازده شاخص مصنوعی تشکیل شده است. بر اساس نتایج حاصله، شاخص کیفیت ژئومورفیک رودخانهٔ نیرچای به خوبی شرایط ژئومورفولوژیکی را منعکس می‌کند بدین صورت که بازهٔ ۲ با کسب امتیاز عالی ۰/۸۵ در طبقهٔ خیلی خوب قرار گرفته است که نشان دهندهٔ پایداری مورفولوژیک آن به دلیل کم‌ترین مداخلات انسانی است. در رتبه‌های بعدی، بازهٔ ۴ (با امتیاز ۰/۵۴)، بازهٔ ۳ (با امتیاز ۰/۶۲) در طبقهٔ متوسط قرار گرفتند و در نهایت، بازهٔ ۶ با کسب پایین‌ترین امتیاز (با مقدار ۰/۴۳) در طبقه کیفیت خیلی ضعیف قرار گرفت که این امر مستقیماً ناشی از مداخلات بیش از حد انسانی و تغییرات مصنوعی گسترده در کانال رودخانه به دلیل توسعه شهری نیر است. بنابراین نتیجه‌گیری می‌گردد که بازهٔ ۲ رودخانه با کسب بالاترین امتیاز دارای بهترین کیفیت ژئومورفولوژیکی و پایداری مناسب‌تری نسبت به سایر بازه‌ها است، در حالی که بازهٔ ۶ با کسب پایین‌ترین امتیاز، ضعیف‌ترین وضعیت را دارد. در نهایت پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، تغییرات شاخص کیفیت ژئومورفولوژیکی (MQI) رودخانهٔ نیرچای در بازه‌های زمانی مختلف با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای ارزیابی شود.

*نویسنده مسئول: فریبا اسفندیاری درآباد E-mail: Esfandyari@uma.ac.ir

مقدمه

رژیم‌های جریانات رودخانه از مهم‌ترین نیروهای اساسی تکامل رودخانه به حساب می‌آیند. رودخانه‌ها علاوه بر نقش خود در انتقال رواناب و حمل رسوب، عملکردهای اکولوژیکی مهمی را انجام می‌دهند؛ زیستگاه ارزشمندی برای گیاهان و جانوران آبزی هستند، به صورت جانبی با اکوسیستم‌های ساحلی در ارتباط بوده و یک کریدور طولی بین محیط‌های زمینی و دریایی را تشکیل می‌دهند. (Downs & Gregory, 2014). گرچه رودخانه‌ها به طور طبیعی فرایندهای دینامیک و پویایی هستند که مستعد تغییرات هیدرولوژیکی و مورفولوژیکی می‌باشند، اما به نظر می‌رسد تأثیرات انسانی باعث تسریع قابل توجه این فرآیندها شده است (Downs & Piégay, 2019). به عبارتی فعالیت‌های انسان بر وضعیت اکوسیستم‌های رودخانه‌ای از طریق تأثیرات مستقیم بر بیوسنوز رودخانه (به عنوان مثال، معرفی گونه‌های بیگانه و مهاجم)، تغییرات در کیفیت آب یا وضعیت فیزیکی زیستگاه‌ها تأثیر می‌گذارد. این رودخانه‌ها توسط تعدادی از زیرساخت‌های آبی مانند سدها، سرریزهای انحرافی، سازه‌های کنترل سیل و تله‌های رسوب تغییر می‌کنند. چنین تغییراتی، هیدرولوژی، پیوستگی و کیفیت زیستگاهی پهنه‌های آبی رودخانه را تغییر داده و وضعیت کلی اکولوژیکی آن‌ها را تخریب می‌کند (Gündüz & Şimşek, 2021). اما با عدم مداخله انسان نیز در کانال‌های رودخانه و دشت‌های سیل، شرایط هیدرومورفولوژیک ثابت نیست بلکه با تغییر شرایط محیطی رودخانه‌ها در آبشارها و کف دره‌ها، تغییرات مداوم را تجربه می‌کند (Dufour & Piégay., 2009). بسیاری از ویژگی‌های کانال‌های رودخانه‌ای، از جمله پیچ و خم رودخانه، تناوبی از ریزابه‌ها، حوضچه‌ها و جریان‌ها و دشت سیلابی، نتیجهٔ این امر هستند. این ویژگی‌ها توسط رودخانه از طریق چرخه‌های فرسایش و رسوب‌گذاری شکل می‌گیرند که به نوبهٔ خود به شدت تحت تأثیر تعادل بین منابع دوگانهٔ آب و رسوبات قرار دارند. ارزیابی ژئومورفولوژیکی رودخانه، تعامل پویا بین رودخانه‌ها و مناظر آن‌ها را در شکل‌گیری کانال‌های رودخانه‌ای و شبکه‌های زهکشی بررسی می‌کند. ژئومورفولوژی رودخانه‌ای کاربردهای عملی زیادی در مدیریت رودخانه دارد و درک ما را از تأثیرات ناشی از تغییر در تأمین آب یا رسوب، تغییرات انسانی در کانال رودخانه و تغییر کاربری زمین در حوضه آبریز افزایش می‌دهد. قدرت جریان، حاصل دبی و شیب، توانایی جریان را در بسیج و انتقال مواد توصیف می‌کند (Allan et al., 2021). رژیم‌های جریان متحول شده در سیستم رودخانه، بر میزان کیفیت رودخانه، منابع انرژی، زیستگاه فیزیکی و میزان ارتباطات زیست‌محیطی اثر می‌گذارد و باعث آسیب رساندن به یکپارچگی زیست محیطی رودخانه‌ها می‌شود (Guo, Jiao, Zhou, Zhu & Wang, 2022). تغییرات هیدرومورفولوژیکی هم‌چنین ممکن است بر ارتباط بین آب‌های سطحی و زیرزمینی نیز تأثیر بگذارد (Hasenmüller & Robinson, 2016). به همین دلیل در خصوص این موضوع مطالعات متعددی در داخل و خارج از ایران انجام شده است که به صورت مختصر به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

نصرتی و همکاران (Nosrati, Rostami & Etminan., 2020)، به ارزیابی شرایط هیدروژئومورفولوژی رودخانه‌ی طالقان با استفاده از شاخص کیفی مورفولوژیک پرداختند و به این نتیجه رسیدند بازهٔ شماره‌ی ۱ با محدودهٔ امتیاز ۰/۷۱ در طبقهٔ خوب قرار گرفته است که از دلایل آن دخالت‌های کم انسانی و واقع بودن در بالادست رودخانه بوده است. اما بازه‌های ۲، ۳، ۵ و ۶ به ترتیب با امتیازهای ۰/۵۸، ۰/۵۴، ۰/۵۹و ۰/۶۱ در طبقهٔ متوسط قرار می‌گیرند که این بازه‌ها نسبت به بازهٔ ۱ میزان دخالت‌های انسانی در آن‌ها بیش‌تر بوده است و در بازهٔ ۴، امتیاز ۰/۴۹ می‌باشد که در طبقهٔ ضعیف قرار می‌گیرد و دلیل آن دخالت‌های انسانی از جمله برداشت شن و ماسه و سازه‌هایی مانند پل می‌باشد. ایلانلو و کرم (Ilanloo & Karam, 2020)، به ارزیابی شرایط هیدرومورفولوژیکی رودخانه جاجرود با استفاده از روش MQI پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تمامی بازه‌های منطقه از لحاظ روش MQI در شرایط ضعیف و خیلی ضعیف قرارگرفته‌اند که این مسائل ناشی از قطع درختان به منظور ایجاد ساخت‌وسازهای انسانی، برداشتن شن و ماسه، ایجاد تفرجگاه‌های متعدد در حواشی رودخانه و تغییر الگوی رودخانه می‌باشد. رضائی و همکاران (Rezaei, Khaleghi & Hosseinzadeh, 2022)، به ارزیابی شرایط هیدرومورفولوژی طالقان رود جهت برنامه‌ریزی محیطی با استفاده از روش‌های MQI و RQI پرداختند. نتایج به دست آمده از روش RQI در پژوهش آن‌ها نشان داد که بازه‌های ۱ تا ۶ که در بالادست سد قرار دارند، دارای وضعیت فقیر بوده و از نظر مدیریتی نیازمند بازسازی سیستم‌های پوشش گیاهی است و بازه‌های ۷ و ۸ نیز در محدودهٔ سد طالقان

و پایین‌دست، دارای وضعیتی متوسط هستند که لازم است تا اقدامات حفاظتی در مورد آن‌ها اجرا شود. هم‌چنین نتایج حاصل از ارزیابی وضعیت مورفولوژیکی رودخانه بیانگر آن است که مناطق بالادست، یعنی بازه‌های ۱ تا ۵ به علت ضعیف شدن فرایندهای فرسایشی ناشی از تغییرات سطح اساس، دارای وضعیت پویایی مورفولوژیکی خیلی ضعیف و بازۀ ۶ که در محدودۀ ورودی سد قرار دارد از نظر شاخص MQI دارای وضعیت دینامیک ضعیف است. بازه‌های ۷ و ۸ به دلیل تغییرات کمتر، دارای بالاترین ضریب هستند و از نظر دینامیک ژئومورفولوژی، پویایی بیش‌تری نسبت به سایر بازه‌ها دارند. فندرسکی و همکاران (Fendereski, Masoudian & Rttcher, 2022)، به ارزیابی شرایط هیدرومورفولوژیکی رودخانه تجن با استفاده از روش HMQI پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند رودخانۀ تجن در بازه‌های مورد مطالعه عمدتاً در طبقه کیفی متوسط قرارگرفته، در حالی که از نظر شرایط هیدرومورفولوژیک در طبقۀ ضعیف گزارش شده که دلیل اصلی آن وجود سد در حوضۀ بالادست در محدودۀ ۳۴ کیلومتری (تمامی بازه‌ها به جز ۴ و ۷) و تغییرات دبی و رسوب، دخالت انسانی و تغییر کاربری اراضی است. میرزائی و همکاران (Mirzaei, Ahmadabadi, Eftekhari & Lotfi, 2024)، به ارزیابی و پهنه‌بندی کیفیت ژئومورفولوژی رودخانه وردآورد تهران با استفاده از مدل MQI پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند به علت توسعه شهری تهران و تغییرات مصنوعی زیاد در کانال رودخانه وردآورد بازه‌های ۱، ۳، ۴، ۶، ۷ به دلیل دخالت‌های زیاد انسان و کانال‌کشی، مسیر رودخانه امتیاز ۰/۲ را کسب نموده و در طبقه خیلی ضعیف قرار گرفته است. هم‌چنین بازه‌های ۲ و ۵ امتیاز ۰/۳ را کسب نموده و در طبقۀ ضعیف قرار دارند و بازه‌های ۸ و ۹ به دلیل دخالت‌های کم انسان و طبیعی ماندن مسیر رودخانه امتیاز ۰/۶ را کسب نموده و در طبقۀ متوسط از لحاظ کیفیت مورفولوژیکی قرارگرفته‌اند. طالبی و همکاران (Talebi, Ayyoubzadeh, Mostafavi, Hosseinzadeh & Shafizadeh, 2024)، به تحلیل و ارزیابی مورفولوژیک رودخانه مبتنی بر ویژگی‌های مورفولوژیک، سازه‌های مصنوعی و تنظیمات آبراهه در رودخانه تالار پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که بیش‌تر مسیرهای رودخانه تالار نیازمند اقدامات فوری برای بازسازی و احیاء است. علاوه بر این، اگرچه روش MQI می‌تواند ابزار مناسب و مؤثری در تشخیص چالش‌های هیدرومورفولوژیکی باشد، با این حال، هنوز برای مدیریت یکپارچه و احیاء کافی نیست و باید با سایر شاخص‌های فشار انسانی مانند کیفیت آب، فشار هیدرولوژیکی و بیولوژیکی ادغام شود. نظافت تکله و همکاران (Nezafat Taklhe, Esfandyari, Mostafazadhe & Abedini, 2025)، به ارزیابی و تحلیل شرایط هیدرومورفولوژیکی رودخانۀ قوری‌چای استان اردبیل با استفاده از شاخص کیفیت مورفولوژیکی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند رودخانۀ قوری‌چای از بازه ۳ تا ۶ در وضعیت ضعیف قرار داشته و شرایط مطلوبی ندارد ولی بر عکس در بازه‌های ۱ و ۲ دارای پویایی مناسبی می‌باشد. احمدی و همکاران (Ahmadi, Karam & Hajehforoshnia, 2025)، در پژوهشی تحت عنوان تحلیل کیفیت مورفولوژیک کریدور رودخانه‌ای شهری زاینده رود در اصفهان با استفاده از روش MQI به این نتیجه رسیدند که بازه‌های اول، پنجم و ششم با امتیازهای ۰/۵۸، ۰/۶۶، ۰/۵۷ در طبقه کیفیت مورفولوژیک متوسط قرار دارند؛ این بازه‌ها خارج از محدودۀ شهری هستند و به لحاظ ژئومورفولوژیک در وضعیت بهتری نسبت به سایر بازه‌ها هستند. بازه‌های دوم و سوم و چهارم نیز به ترتیب با امتیازهای ۰/۴۸، ۰/۴۱، ۰/۳۸، در محدودۀ شهری قرارگرفته‌اند و بیش‌ترین تغییرات انسانی را متحمل شده‌اند و به لحاظ ژئومورفولوژیک در ضعیف‌ترین حالت قرار دارند. هم‌چنین در ذیل به برخی از مطالعات خارجی اشاره می‌گردد. هاجدوکیویز و همکاران (Hajdukiewicz et al., 2017)، به ارزیابی کیفیت هیدرومورفولوژیکی رودخانه با استفاده از روش RHQ پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود تفاوت‌های قابل توجهی را در کیفیت هیدرومورفولوژیکی بین مقاطع رودخانه‌ای مدیریت نشده و کانالیزه شده مشاهده کردند، که نشان‌دهندۀ تنظیم کانال به عنوان علت اصلی تخریب هیدرومورفولوژیکی بالا و تأیید انتخاب کریدور رودخانه‌ای فرسایش‌پذیر به عنوان روش مناسب احیای آن است.

گوندوز و سیمسک (Gündüz & Şimşek, 2021)، به ارزیابی تغییرات رودخانه با استفاده از شاخص هیدرومورفولوژیکی جدید پرداختند. ایشان نتیجه گرفتند که اثرات مانع در کاهش تداوم رودخانه بسیار مهم بوده و اصلاح بستر برای کنترل سیل منجر به تخریب کیفیت زیستگاه‌های درون رودخانه و کناره رودخانه شده است.

فلیسیا و همکاران (Felisia, Sternberg, Ratner, Drori & Egozi, 2022)، در پژوهشی تحت عنوان ارزیابی تغییرات رودخانه با استفاده از شاخص هیدرومورفولوژیکی جدید به این نتیجه رسیدند که اثرات مانع در کاهش تداوم رودخانه بسیار مهم بوده و اصلاح بستر برای کنترل سیل منجر به تخریب کیفیت زیستگاه‌های درون رودخانه و کناره رودخانه شده است. بنابراین روش شاخص توسعه یافته می‌تواند به‌عنوان ابزاری سیستماتیک برای ارزیابی هیدرومورفولوژی و تأثیر مرتبط با آن در وضعیت اکولوژیکی رودخانه‌ها عمل کند. ایلانلو (Ilanloo, 2025)، به ارزیابی هیدرومورفولوژی رودخانه میگون- فشم با استفاده از شاخص کیفیت مورفولوژیکی پرداخت. وی به این نتیجه رسید تغییرات زیادی در بستر این بخش از رودخانه رخ داده است. در قسمت‌های شمالی، به دلیل محدودیت رودخانه در دو طرف، شدت تغییرات کمتر است، درحالی‌که در قسمت‌های میانی رودخانه، با توجه به ساخت و سازهای متعدد در دو طرف رودخانه، شدت تخریب نیز بیش‌تر است. مطالعات پیشین داخلی و خارجی بر ارزیابی کمی کیفیت ژئومورفولوژیکی رودخانه‌ها، عمدتاً با بهره‌گیری از شاخص‌هایی نظیر MQI، تمرکز کرده و اختلالات ناشی از برداشت مصالح و تغییر کاربری اراضی را به‌عنوان عامل اصلی کاهش مقاومت اکولوژیکی شناسایی کرده‌اند. ضرورت و اهمیت بررسی رودخانه نیرچای در این پژوهش، از این لحاظ است که این رودخانه به عنوان شریان اصلی به طور فزاینده‌ای تحت تأثیر فشارهای هیدرومورفولوژیکی ناشی از تغییرات کاربری اراضی، برداشت‌های بی‌رویه از بستر رودخانه و دگرگونی‌های اقلیمی قرار دارد و این تنش‌ها به‌طور مستقیم منجر به تخریب ساختار هیدرومورفولوژیکی، تشدید فرسایش کناره‌ها و تخریب اکوسیستم‌های حاشیه رودخانه می‌شوند. هم‌چنین این رودخانه تاکنون به عنوان یک نمونه مطالعاتی در این چارچوب مورد ارزیابی قرار نگرفته است؛ از این رو به کارگیری روش کمی و استاندارد شاخص کیفیت ژئومورفولوژیکی (MQI)، که برای نخستین بار بر روی این سیستم رودخانه‌ای اعمال می‌گردد، امری ضروری است؛ بنابراین هدف از پژوهش حاضر ارزیابی کیفیت ژئومورفولوژیکی رودخانه نیرچای با استفاده از شاخص MQI می‌باشد.

منطقهٔ مورد مطالعه

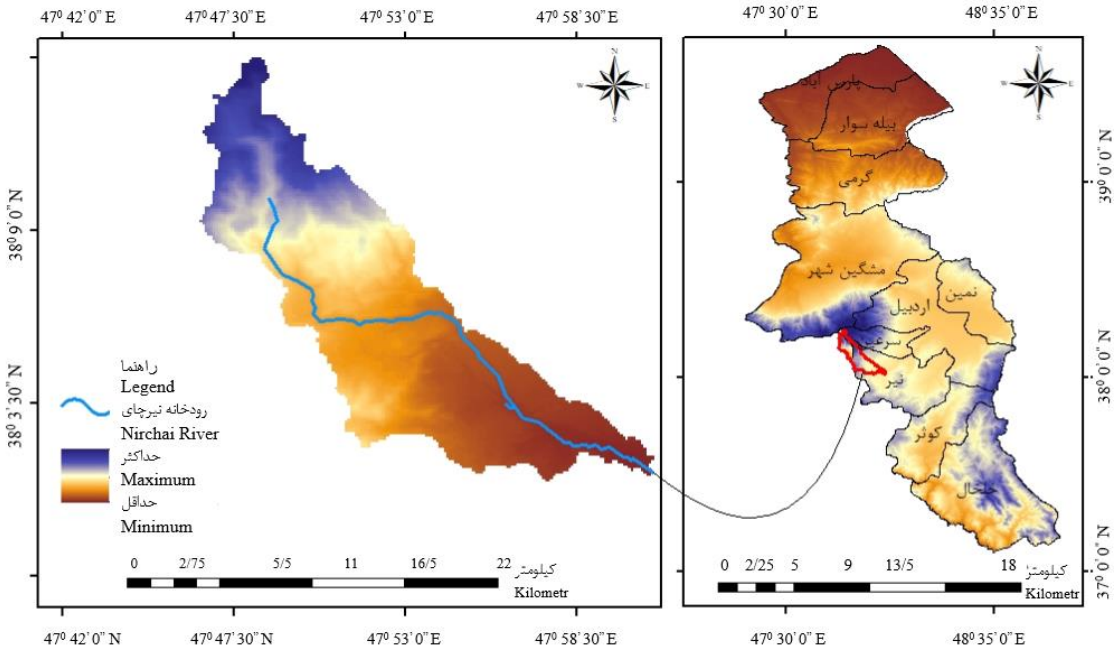
حوضهٔ آبخیز رودخانه نیرچای، منطقه‌ای با توپوگرافی مشخص است که بخش اعظم مساحت آن در ارتفاعات بین ۱۶۰۰ تا ۲۲۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است. رودخانه نیرچای با مختصات جغرافیایی ۴۷ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۱ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی یکی از شریان‌های اصلی این حوضه آبخیز می‌باشد (شکل۱). نیرچای از نظر سیاسی - اداری در محدودهٔ شهرستان‌های نیر و سرعین در استان اردبیل و سراب در استان آذربایجان شرقی قرارگرفته است. آبراهه اصلی حوضه نیرچای، رودخانه نیرچای به طول تقریبی ۴۲ کیلومتر می‌باشد که از ارتفاعات تودهٔ آتشفشانی سبلان سرچشمه می‌گیرد. این رودخانه پس از زهکشی قسمت‌هایی از دامنه‌های جنوبی توده آتشفشانی سبلان و دریافت چندین انشعاب فرعی پس از عبور از شهر نیر به رودخانه بالیخلی‌چای منتهی می‌شود (Esfandyari Darabad & Nezafat-Takleh, 2023).

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از لحاظ ماهیت توصیفی تحلیلی بوده و از منظر هدف، در گروه پژوهش‌های کاربردی قرار می‌گیرد. در این مطالعه، جمع‌آوری داده‌های اولیه از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و بازدیدهای میدانی دقیق از مسیر رودخانه نیرچای صورت پذیرفت. در گام نخست، داده‌های ژئومورفیک (شامل نقشه‌های توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای)، داده‌های زمین‌شناسی، داده‌های اقلیمی، و اطلاعات جامع هیدرولوژیکی، از جمله آمار دبی ایستگاه نیرچای و جزئیات آبراهه‌ها و منابع آب، برای تعیین شرایط مرجع و مؤلفه‌های اصلی شاخص MQI گردآوری شدند. در گام بعدی، اطلاعات مربوط به فشارهای انسانی و سازه‌های مهندسی در حاشیه رودخانه مستندسازی گردید. برای تهیه نقشه‌های موقعیت جغرافیایی و مشخص کردن بازه‌ها، از نرم‌افزار Arc GIS و تصاویر Google Earth بهره گرفته شد. در نهایت، محاسبات کمی شاخص‌های MQI (شاخص کیفیت ژئومورفولوژیکی[1]) و IP (شاخص فشار) و پردازش‌های آماری

1- Morphological Quality Index

مربوطه، با استفاده از نرم‌افزار Excel Estat انجام گرفت تا ارزیابی ساختاریافته از وضعیت هیدرومورفولوژیک رودخانه نیرچای ارائه شود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیای رودخانه نیرچای در استان اردبیل

Fig.1. Geographical location of the Nirchai River in Ardabil Province

شاخص کیفیت ژئومورفولوژیک

یکی از روش‌های طبقه‌بندی رودخانه که امروزه مورد توجه قرارگرفته است روش طبقه‌بندی بر اساس شاخص کیفیت ژئومورفولوژیک (MQI) است. این روش در سال ۲۰۱۳ توسط رینالدی و همکاران (Rinaldi et al., 2013) مطرح شد. به عبارتی این روش با در نظر گرفتن اشکال و فرایندهای رودخانه‌ای به ارزیابی کیفیت ژئومورفولوژیک می‌پردازد. در این روش شرایط هیدروژئومورفولوژیکی از معیارهای تعریف‌شده (MQI)، پیروی می‌کند. به عبارتی در شاخص کیفیت ژئومورفولوژیک نمرات پایین نشان دهندهٔ شرایط طبیعی و نمرات بالا نشان دهندهٔ عناصر مصنوعی می‌باشد (Rinaldi, Gurnell, Del Tánago, Bussettini & Hendriks, 2016).

معیارهای شاخص کیفیت ژئومورفولوژیک (MQI)، از ۱۳ شاخص عملکردی (F1-F13)، ۱۲ شاخص مصنوعی (A1-A12) تشکیل شده است.

شاخص‌های عملکردی: به ارزیابی میزان انطباق اشکال و فرآیندهای جاری کانال با الگوهای مورفولوژی مورد انتظار می‌پردازند.

شاخص‌های مصنوعی: عناصر مصنوعی را در حوزه و امتداد بازه‌ها بررسی می‌کنند. این عناصر مصنوعی نیز در سه جنبهٔ پیوستگی (ایجاد سدها و تغییرات دبی و رسوب از بالادست به پایین‌دست)، مورفولوژی (مانند سازه‌های عرضی، محافظ‌های کرانه، خاک‌ریزهای مصنوعی و غیره) پوشش (جابه‌جایی واریزه‌های چوبی موجود در بازه و قطع و تخریب گیاهان حاشیه رود به وسیله انسان)، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

شاخص تعدیلی: برای کانال‌های بزرگ (عرض بزرگ‌تر از ۳۰ متر) ارزیابی می‌شوند. چگونگی تعریف طبقه‌ها و امتیازات در جدول ۱ آمده است.

به منظور تحلیل و تجزیه شرایط شاخص کیفیت ژئومورفولوژیکی رودخانه، پس از امتیازدهی شاخص‌ها، ابتدا با استفاده از رابطه (۱)، شاخص کیفیت ژئومورفولوژیکی رودخانه محاسبه می‌شود.

$$MAI = Stot / Smax \quad (۱)$$

در اینجا منظور از Stot مجموع امتیازات و Smax حداکثر امتیاز طبقه C هر شاخص است. بر این اساس دامنه MAI از صفر (بدون تغییرات) تا ۱ (حداکثر تغییرات) را در برمی‌گیرد (رابطه ۲).

$$MQI=1-MAI \quad (۲)$$

بر همین اساس، در این شاخص: نسبت کاملاً مستقیمی با کیفیت بازه و نسبت معکوسی با تغییرات بازه دارد و از امتیاز صفر (حداقل کیفیت)، تا امتیاز ۱ (حداکثر کیفیت) در نوسان است. در شاخص آشفتگی مورفولوژیکی (MAI)، MAI=0 به این معنی است که سیستم تغییری ندارد و MAI = 1 به این معنی است که سیستم به شدت تغییر کرده است. هم چنین در شاخص کیفیت مورفولوژیکی (MQI)، MQI = 0 به معنای کیفیت پایین سیستم است و MQI = 1 به معنای کیفیت عالی سیستم است. به عبارتی یک سیستم طبیعی باکیفیت بالا و دست نخورده دارای MAI = 0 و MQI = 1 خواهد بود (Rinaldi et al., 2013).

جدول ۱- شاخص عملکردی ژئومورفولوژیکی، شاخص مصنوعی، شاخص تعدیل‌کننده کانال: توصیف طبقه‌ها و امتیازات

Table 1- Geomorphological functional index, artificial index, and channel-modifying index: class descriptions and scores (Rinaldi et al., 2013)

شاخص عملکردی ژئومورفولوژیکی Geomorphological Functional Index		
شاخص‌ها Indicators	**طبقه‌ها و امتیازات** **Classes and Scores**	**نحوه بررسی** **Assessment Method**
F1	پیوستگی طولی در رسوب Longitudinal Sediment Continuity A:0, B:3, C:5	بازدیدها و برداشت‌های میدانی Field Visits and Observations
F2	دشت سیلابی Floodplain A:0, B:3, C:5	بازدیدها و برداشت‌های میدانی Field Visits and Observations
F3	پیوستگی رودخانه و دامنه River and Slope Continuity A:0, B:3, C:5	بازدیدها و برداشت‌های میدانی Field Visits and Observations
F4	فرایند پس‌روی کرانه Bank Recession Process A:0, B:2, C:3	بازدیدها و برداشت‌های میدانی Field Visits and Observations
F5	وجود کریدور بالقوه فرسایش پذیر Existence of Potential Erosion Corridor	بازدیدها و برداشت‌های میدانی Field Visits and Observations
F6	اشکال بستر و شیب دره Valley Bed and Slope Shapes A:0, B:3, C:5	بازدیدها و برداشت‌های میدانی Field Visits and Observations
F7	اشکال الگوی کانال Channel Pattern Shapes A:0, B:3, C:5	بازدیدها و برداشت‌های میدانی Field Visits and Observations
F8	اشکال معمولی در دشت Typical Plain Shapes A:0, B:2, C:3	بازدیدها و برداشت‌های میدانی Field Visits and Observations
F9	تغییرات مقطع عرضی Cross-sectional changes A:0, B:3, C:5	بازدیدها و برداشت‌های میدانی Field Visits and Observations
F10	ساختار بستر کانال Channel bed structure A:0, B:2, C1:5, C2:6	بررسی میدانی و ارزیابی بصری Field survey and visual assessment

F11	وجود چوب‌های بزرگ در درون کانال Presence of large trees in the channel A:0, B:3	بررسی میدانی و ارزیابی بصری Field survey and visual assessment
F12	محدودهٔ گیاهان عملکردی Functional plant range A:0, B:2, C:3	اندازه‌گیری عرض متوسط پوشش Measurement of average width of vegetation cover
F13	گسترش خطی گیاهان عملکردی Linear expansion of functional plants A:0, B:3, C:5	اندازه‌گیری عرض متوسط پوشش Measurement of average width of vegetation cover
	شاخص مصنوعی **Artificial index**	
A1	تغییر در بالادست جریان Upstream flow change A:0, B:3, C:6	داده‌های هیدرولیکی، تغییرات در دبی Hydraulic data, changes in discharge
A2	تغییر در بالادست دبی رسوبی Upstream sediment discharge change A:0, B1:0 B2:3, C1:6, C2:12	بازدیدها و برداشت‌های میدانی Field Visits and Observations
A3	تغییر جریان Flow change A:0, B:3, C:6	داده‌های هیدرولیکی Hydraulic data
A4	تغییر دبی رسوب Sediment flow change A:0, B:4, C:6	بازدیدها و برداشت‌های میدانی Field Visits and Observations
A5	سازه‌های عرضی Transverse structures A:0, B:2, C:3	بازدیدها و برداشت‌های میدانی Field Visits and Observations
A6	محافظت کناره Bank protection A:0, B:3, C:6	بازدیدها و برداشت‌های میدانی Field Visits and Observations
A7	خاک‌ریزهای مصنوعی Artificial embankments A:0, B:3, C:6	بازدیدها و برداشت‌های میدانی Field Visits and Observations
A8	تغییرات مصنوعی Artificial changes A:0, B:2, C:3	اطلاعات تاریخی و کتابخانه‌ای، بازدیدها و برداشت‌های میدانی Historical and library information, field visits and observations
A9	سایر عوامل ثابت‌کننده بستر Other bed stabilization factors A:0, B:3, C1:6, C2:8	بازدیدها و برداشت‌های میدانی Field Visits and Observations
A10	حرکات رسوب Sediment movements A:0, B:3, C:6	بازدیدها و برداشت‌های میدانی Field Visits and Observations
A11	حرکات چوب Timber movements A:0, B:2, C:5	بازدیدها و برداشت‌های میدانی Field Visits and Observations
A12	مدیریت پوشش Vegetation management A:0, B:2, C:5	بازدیدها و برداشت‌های میدانی Field Visits and Observations

جدول ۲- مقادیر شاخص کیفیت ژئومورفولوژیکی

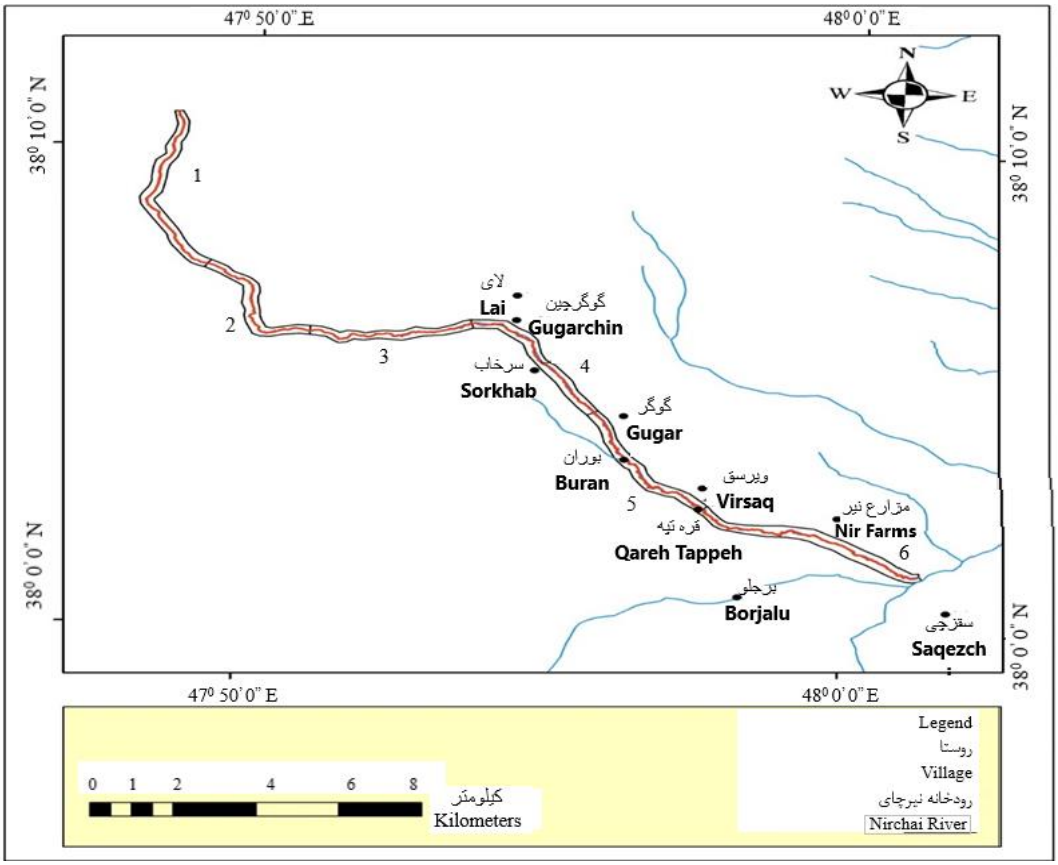
Table 2- Geomorphological quality index values

MQI	بیش از 0/85	0/7 تا 0/85	0/5 تا 0/7	0/3 تا 0/5	کم‌تر از 0/3
کیفیت Quality	خیلی خوب Very good	خوب Good	متوسط Average	ضعیف Poor	خیلی ضعیف Very poor

نتایج و بحث

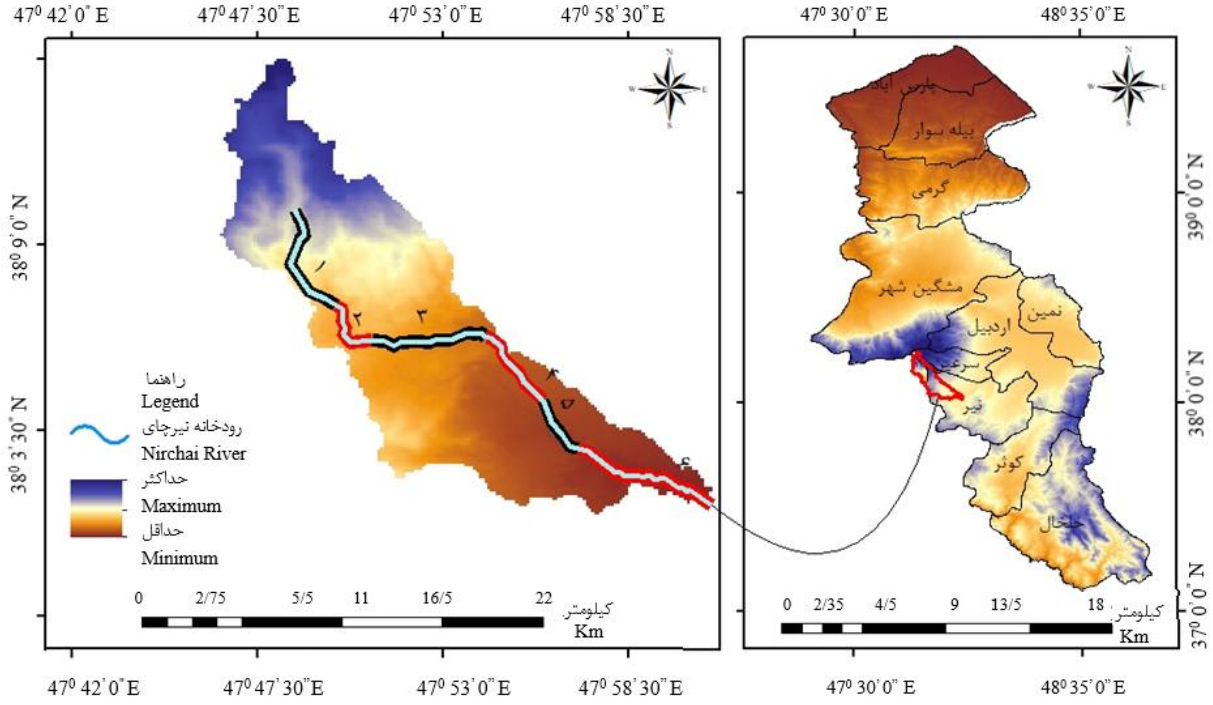
نتایج حاصله از ارزیابی شاخص کیفیت ژئومورفولوژیک (MQI)، در رودخانه نیرچای استان اردبیل

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کیفیت ژئومورفولوژیکی رودخانه نیرچای (استان اردبیل) با استفاده از شاخص (MQI)، رودخانه را به ۶ بازهٔ مجزا تقسیم‌بندی کرد (اشکال ۲ و ۳). این تفکیک فضایی، ضرورتی است برای درک توزیع ناهمگن پویایی رودخانه که تحت تأثیر عوامل طبیعی و مداخلات انسانی قرار دارد که بر اساس طول کلی رودخانه و روش شاخص کیفیت ژئومورفیک صورت گرفته است.



شکل ۲- بازه‌های مورد مطالعه در رودخانه نیرچای در استان اردبیل

Fig. 2. Study reaches in the Nirchai River in Ardabil Province



شکل ۳- موقعیت جغرافیایی بازه‌های مورد مطالعه در رودخانه نیرچای استان اردبیل

Fig. 3. Geographical location of the study reaches along the Nirchay River in Ardabil Province

نتایج ارزیابی شاخص کیفیت ژئومورفولوژیک در بازه ۱

مطابق با مشاهدات میدانی، طول رودخانه نیرچای در بازۀ اول به میزان ۷ کیلومتر اندازه‌گیری شده است. عرض رودخانه در این بخش به طور قابل‌توجهی بین ۱ تا ۸ متر متغیر است. این تفاوت‌ها ناشی از ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی منطقه، نظیر شیب، جنس بستر رودخانه و تغییرات فصلی در جریان آب می‌باشد. در این بازه، رودخانه در یک منطقۀ کوهستانی با شیب‌های تند قرار دارد که موجب افزایش پیچ‌وخم‌های مسیر رودخانه شده است. طبق تحلیل‌ها و مشاهدات (شکل ۴)، بازۀ اول رودخانه دارای ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی برجسته‌ای است که شامل دره‌های عمیق سنگلاخ و رفتار هیدرولوژیکی ناپایدار می‌باشد. رودخانه در این بخش دارای مسیری پیچیده است که نتیجۀ آن افزایش خطر فرسایش بستر و دیواره‌ها و هم‌چنین تغییرات در الگوی جریان آب می‌باشد. علاوه بر این، پوشش گیاهی ضعیف در این منطقه، نشان‌دهندۀ شرایط خاص زیست‌محیطی است که ناشی از عواملی چون رطوبت پایین، شیب‌های تند، و هم‌چنین جریان سریع‌تر آب می‌باشد. با عنایت به ماهیت بکر و فقدان مداخله انسان‌ساخت در این بخش، کسب ضریب پایداری ۰/۴۳ نشان‌دهندۀ تسلط فرآیندهای هیدرودینامیکی و عوامل ذاتی ژئومورفولوژیکی (مانند گرادیان طولی شدید) است که پتانسیل خودتنظیمی رودخانه را محدود نموده و عملکرد آن را از منظر پایداری کلی، در جایگاه بهینه قرار نمی‌دهد. این مقدار نشان‌دهنده وضعیت ضعیف پایداری ژئومورفیک در این منطقه است. به عبارت دیگر، رودخانه در این بخش با خطراتی همچون فرسایش بستر، تغییرات ناگهانی در جریان آب، و تخریب دیواره‌های رودخانه مواجه است که می‌تواند منجر به تغییرات اساسی در ویژگی‌های هیدرودینامیکی منطقه شود. بر این اساس، نتایج حاصل از شاخص کیفیت ژئومورفیک و مشاهدات میدانی نشان می‌دهند که بازۀ اول رودخانه نیرچای در وضعیت پایداری نسبتاً ضعیفی قرار دارد. این وضعیت می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی باشد، از جمله:

۱. شیب تند و پیچ‌های زیاد در مسیر رودخانه که موجب افزایش سرعت جریان آب و در نتیجه افزایش فرسایش بستر می‌شود.

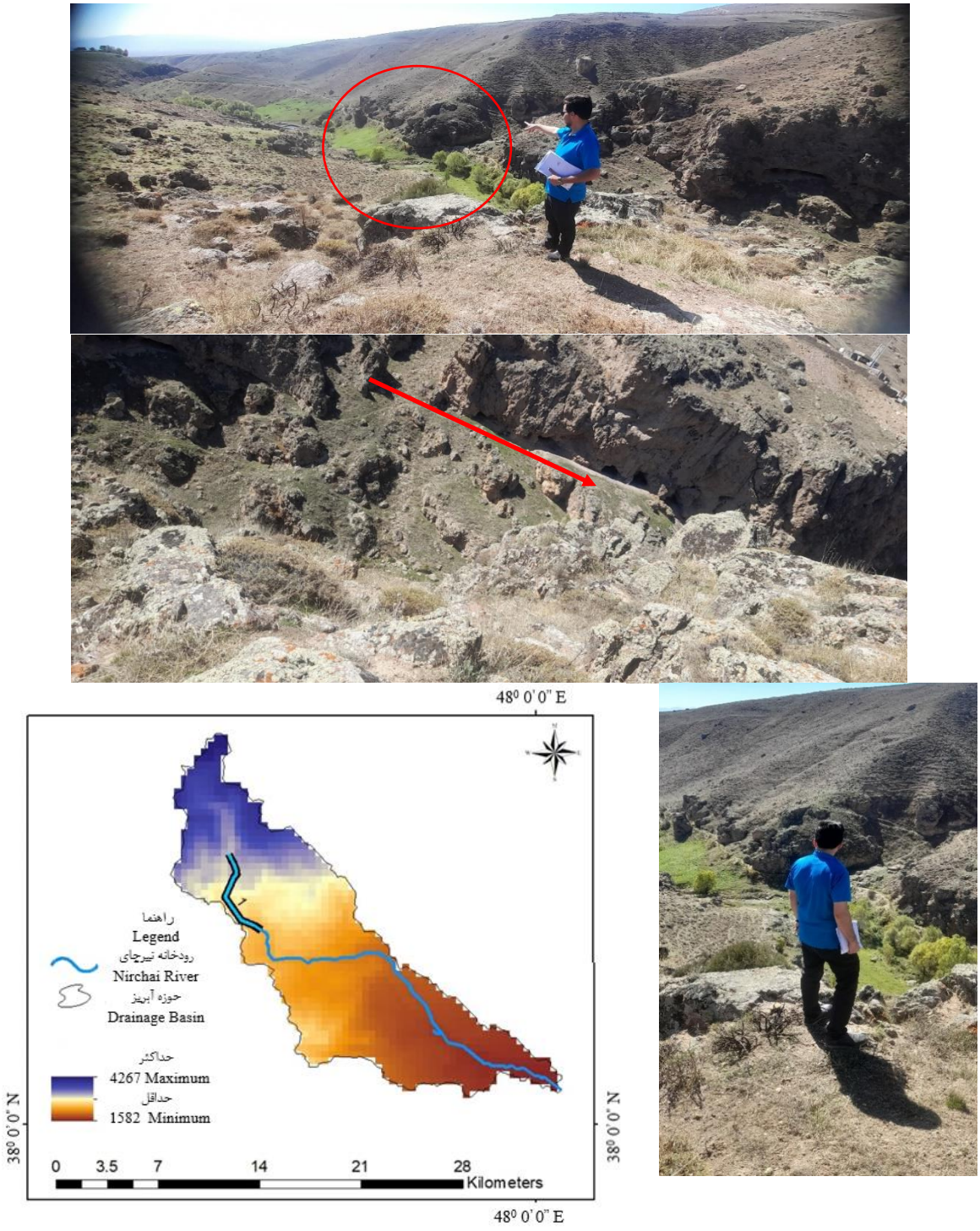
۲. ساختار زمین‌شناسی منطقه شامل سنگ‌های سخت و مقاوم است که اگر چه در برابر فرسایش مقاومت بالایی دارند، اما در نواحی دارای شکستگی‌ها و درزه‌های فعال، می‌توانند موجب ناپایداری موضعی و ریزلغزش‌های محدود در دیواره‌ها شوند. ۳. پوشش گیاهی که می‌تواند در تثبیت خاک و کاهش فرسایش نقش مؤثری داشته باشد، اما در این منطقه به طور قابل‌توجهی کم است. ۴. عدم دخالت انسانی که اگر چه از منظر بکر بودن مفید است، اما ممکن است نشان دهندهٔ کمبود اقدامات حفاظتی یا مدیریت منابع در این منطقه باشد.

نتایج ارزیابی شاخص کیفیت ژئومورفولوژیک در بازه ۲

بازهٔ دوم رودخانه نیرچای، به عنوان یک قطعهٔ طولی به طول ۴ کیلومتر، دارای یک تطابق بسیار پویا است که دامنهٔ تغییرات آن از ۲ متر تا ۱۲ متر را در بر می‌گیرد. این تنوع عرضی، نشان دهندهٔ توزیع نابرابر تنش برشی در بستر رودخانه است. اصلی‌ترین عامل کنترل‌کننده دینامیک این بازه، رسیدن به سطح پایه هیدرولوژیکی است که منجر به کاهش شدید و تدریجی شیب پروفیل طولی شده است. این کاهش شیب، به طور مستقیم ظرفیت حمل رسوب را کاهش داده و نیروی محرکه اصلی برای رسوب‌گذاری درشت‌دانه در دشت‌های آبرفتی حاشیه‌ای می‌شود. بر اساس مطالعات میدانی، مداخلات انسانی در این بازه کمتر از سایر بازه‌ها بوده است. به عبارتی نتایج حاصله از شاخص کیفیت ژئومورفیک نشان می‌دهد که هر چقدر مداخلات انسانی و تغییرات انسانی کمتر باشد به همان میزان رودخانه دارای پایداری بهتری خواهد بود و این امر در این بازه نسبت به سایر بازه‌ها کاملاً مشهود است. بنابراین نتایج کمی حاصل از شاخص کیفیت ژئومورفیک (MQI)، یک یافته کلیدی را آشکار می‌سازد: ضریب پایداری ۰/۸۵ که رودخانه را در رده خیلی خوب قرار می‌دهد (جداول ۳ و ۴).

نتایج ارزیابی شاخص کیفیت ژئومورفولوژیک در بازه ۳

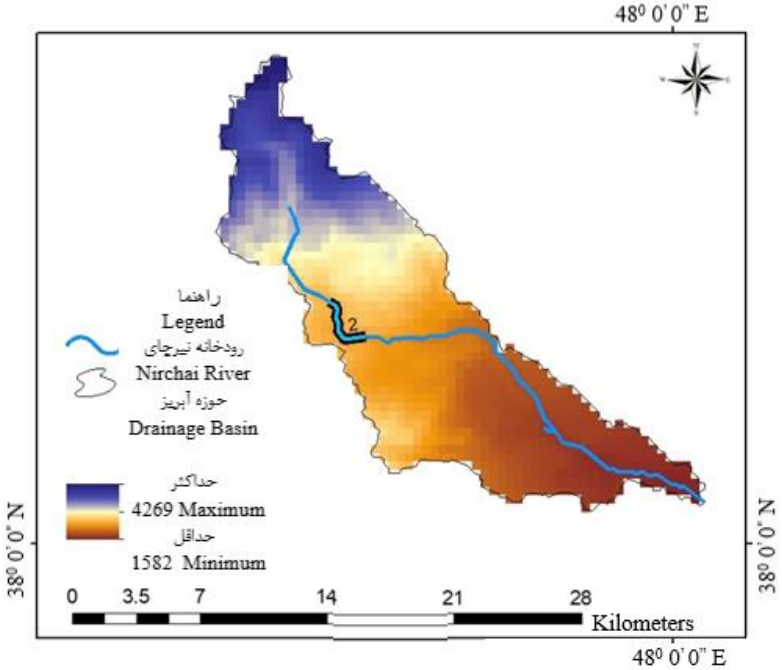
بر اساس نتایج به دست آمده و بازدیدهای میدانی، بازهٔ سوم رودخانهٔ نیرچای، طولی معادل ۴ کیلومتر را شامل می‌شود و عرض کانال نیز در این بازه تغییرپذیری بالایی را نشان می‌دهد و از حداقل ۲ متر تا حداکثر ۸ متر متغیر است؛ این نوسان در عرض کانال، نشان‌دهندهٔ پاسخ‌های متفاوتی به شرایط هیدرولوژیکی و لیتولوژیکی محلی است. بررسی الگوی پلتفرم کانال، همان‌طور که در شکل ۶ مستند شده است، نشان‌دهندهٔ سینوزیته بالا و وجود پیچ‌وخم‌های مکرر و متعدد است. این ویژگی بیانگر یک فرآیند طبیعی انتقال انرژی است که در آن جریان رودخانه با توجه به شیب کم یا متوسط و مواد بستر قابل فرسایش، مسیر خود را به صورت جانبی توسعه داده است. از جنبهٔ اکوژئومورفولوژیکی، وجود پوشش گیاهی حاشیه رودخانه یک امتیاز حیاتی و یک عامل تثبیت‌کننده بیومکانیکی مهم برای کناره‌ها محسوب می‌شود که مقاومت آن‌ها را در برابر تنش‌های برشی جریان‌های ثانویه افزایش می‌دهد؛ علاوه بر این، نتایج حاکی از اتصال مستقیم دامنه، به کانال رودخانه است. این اتصال به معنای محدودیت جانبی کانال است که تبادل رسوب و انرژی بین رودخانه و دشت سیلابی را محدود می‌کند. هم‌چنین در بخش‌های ابتدایی بازهٔ سوم، یک پس‌روی کوچک در کناره‌های رودخانه مشاهده می‌شود. با این حال، میزان دخالت‌های انسانی و تغییرات مصنوعی در ساختار رودخانه در این بخش نسبتاً کم ارزیابی شده است، که نشان می‌دهد فرآیندهای ژئومورفولوژیکی در این بخش عمدتاً تحت کنترل عوامل طبیعی قرار دارند. هم‌چنین نتایج محاسبات بر اساس شاخص‌های عملکردی و مصنوعی، که جزئیات آن‌ها در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است، نشان داد که ضریب پایداری بازهٔ سوم برابر با ۰/۵۳ است که رودخانه را در طبقهٔ کیفیت متوسط قرار می‌دهد.



شکل ۴- تصاویر بازهٔ ۱ رودخانهٔ نیرچای در استان اردبیل

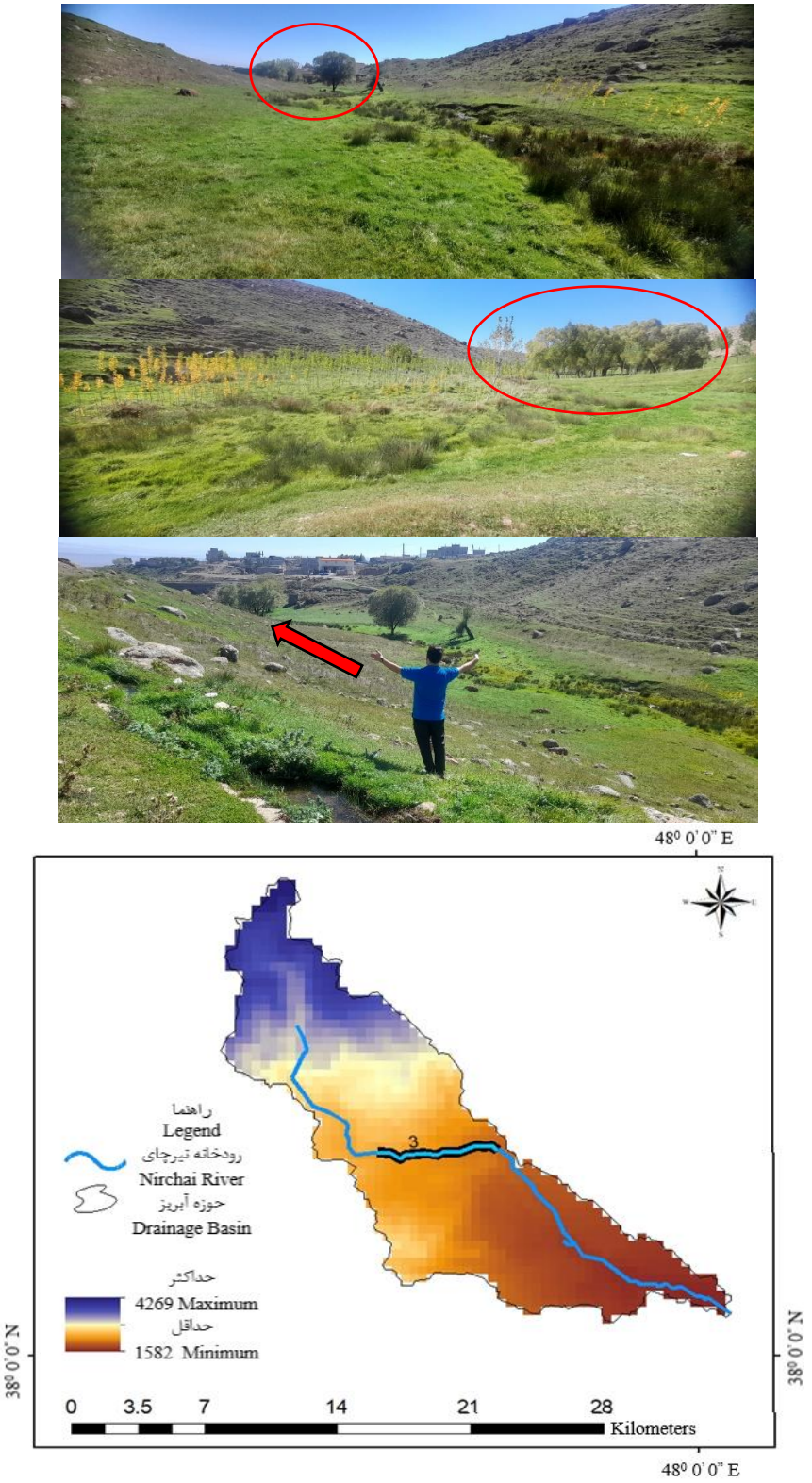
Fig.4. Images of Reach 1 of the Nirchai River in Ardabil Province





شکل ۵- تصاویر بازهٔ ۲ رودخانه نیرچای در استان اردبیل

Fig.5. Images of Reach 2 of the Nirchai River in Ardabil Province



شکل ۶–تصاویر بازهٔ ۳ رودخانهٔ نیرچای در استان اردبیل

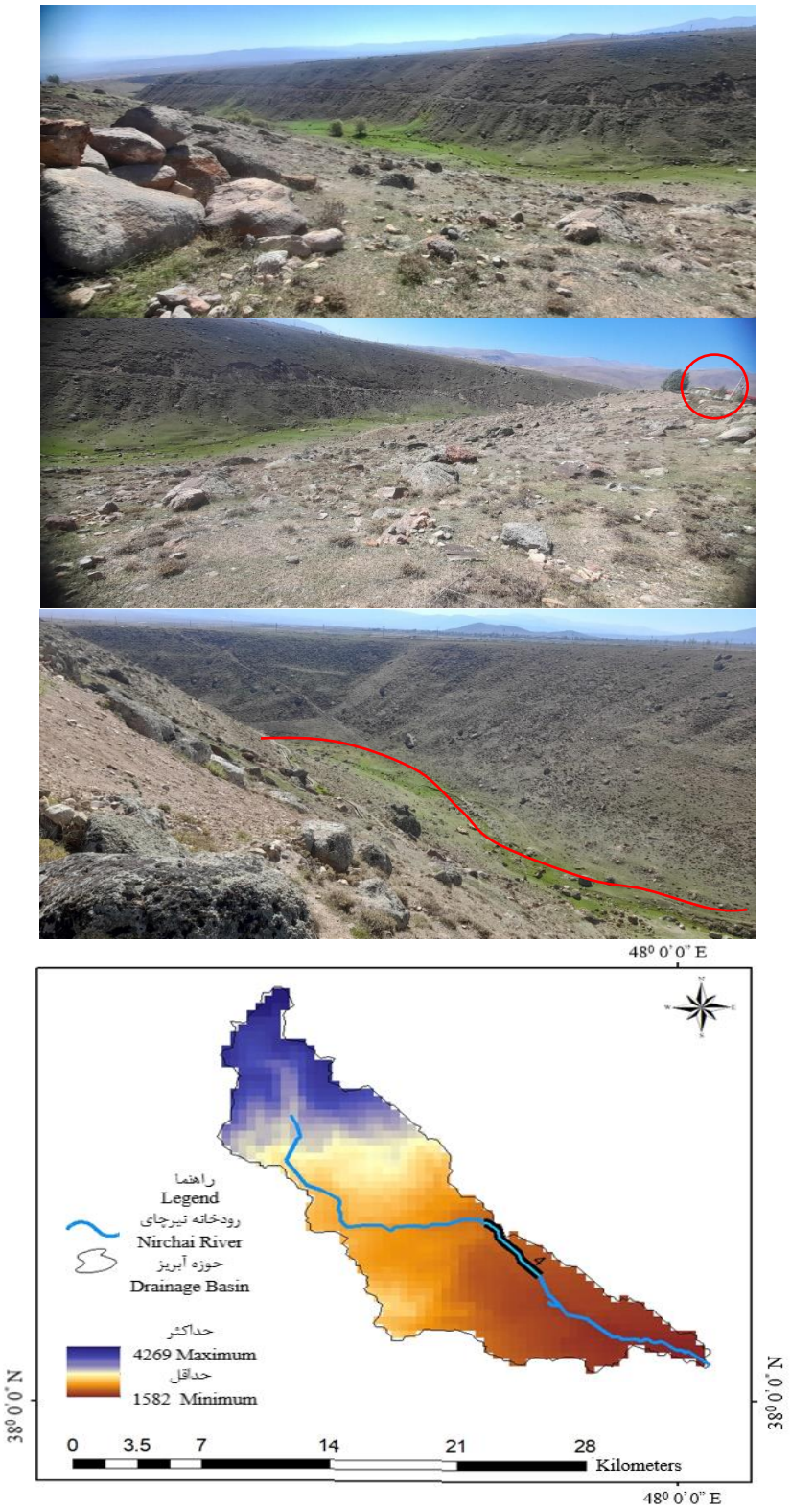
Fig.6. Images of Reach 3 of the Nirchai River in Ardabil Province

نتایج ارزیابی شاخص کیفیت ژئومورفولوژیک در بازه ۴

بر اساس نتایج حاصله از ارزیابی بازۀ چهارم رودخانه نیرچای با شاخص کیفیت ژئومورفولوژیکی، این بازه، به طول ۵ کیلومتر و با گستره‌ای از منطقه گوگرچین تا گوگر یک مقطع پیچان‌رود فعال را به نمایش می‌گذارد که با نوسانات شدید در عرض کانال، از ۳ تا ۱۵ متر، مشخص می‌شود؛ این میزان از عدم یکنواختی هندسی، منعکس کنندۀ فعالیت‌های متمرکز فرسایشی و رسوب‌گذاری موضعی در پاسخ به تنوع شرایط زمین‌شناختی و هیدرولیکی بستر است. تحلیل مورفودینامیک کانال، الگویی متناوب از پس‌روی در بخش ابتدایی و سپس پیش‌روی یا مهاجرت جانبی را در ادامه نشان می‌دهد که بر دینامیک فعال این بازه و جابه‌جایی افقی پیچان‌رودها دلالت دارد. هم‌چنین یافته‌های حاصل از مشاهدات میدانی و تحلیل‌های مربوطه، پوشش گیاهی ضعیف را در اطراف بازۀ سوم تأیید می‌کند که پیامدهای جدی برای پایداری کناره‌های رودخانه و کیفیت اکولوژیکی آن در پی دارد. هم‌چنین، عدم احداث هرگونه سازۀ مصنوعی، اتصال طولی را برای جریان آزاد رسوب و انرژی حفظ کرده است. با این وجود، ضریب پایداری ژئومورفیک بازۀ چهارم برابر با ۰/۵۴ است که آن را در طبقۀ متوسط قرار می‌دهد؛ این نمره، نشان دهندۀ یک تعادل پویا است که در آن، تنش‌های هیدرولیکی داخلی و بار رسوبی بالا، با وجود اثر تثبیت‌کنندگی پوشش گیاهی، سیستم را در آستانه حساسیت نگه داشته و قابلیت بالای رودخانه برای تنظیم خودکار در برابر عدم تعادل‌های مورفولوژیکی را نمایان می‌سازد.

نتایج ارزیابی شاخص کیفیت ژئومورفولوژیک در بازۀ ۵

بازۀ پنجم رودخانه نیرچای، به‌عنوان یکی از مقاطع پایانی موردبررسی، با طول ۵ کیلومتر و دامنه تغییرات عرضی گسترده‌تر در بخش‌های کم‌عمق‌تر، از منطقۀ گوگر تا قره‌تپه امتداد می‌یابد و مشخصه بارز آن گسترش پهنای کانال، با عرضی متغیر بین ۴ تا ۱۵ متر است. این افزایش پهنا، به ویژه در مقایسه با عرض‌های حداکثری در بازه‌های قبلی، اغلب نشان‌دهندۀ کاهش نیروی برشی فعال در کف و دیواره‌های رودخانه، یا تبدیل شدن به یک سیستم توزیع‌کننده است که در آن، انرژی جریان در سطح وسیع‌تری تلف می‌شود. نکتۀ حائز اهمیت در این بازه، تأثیر مستقیم دخالت انسانی است؛ احداث پل در مسیر جریان، به عنوان یک مانع موضعی، سبب اختلال در الگوی طبیعی انتقال رسوب و فرآیندهای فرسایش/ تراکم شده و می‌تواند به‌عنوان یک کانون تنش ژئومورفولوژیکی موضعی عمل کند که ممکن است منجر به ایجاد تغییرات هیدرولیکی غیرطبیعی در بالادست یا پایین‌دست سازه شود. علی‌رغم این دخالت، بازۀ پنجم دارای پوشش گیاهی طولی فراوان است که عاملی قوی در تثبیت کناره‌ها و جلوگیری از فرسایش جانبی در غیاب جریان‌های شدید محسوب می‌شود؛ هرچند که این پوشش گیاهی در محدودۀ دشت سیلابی بسیار کوچک جای گرفته است، که نشان دهندۀ محدودیت فضای جانبی رودخانه برای توسعه طبیعی و سازگاری با فرآیندهای سیلابی وسیع است. مهم‌تر از همه، شاخص کیفی ژئومورفیک برای بازۀ پنجم، با کسب امتیاز ۰/۷۵، آن را به بالاترین طبقۀ پایداری، یعنی طبقۀ خوب، ارتقا داده است؛ این بهبود قابل‌توجه نسبت به بازه‌های قبلی، به وضوح نشان می‌دهد که ترکیبی از تثبیت‌کنندگی قوی بیولوژیکی (پوشش گیاهی)، احتمالاً در ترکیب با کاهش شیب طولی مؤثر و هم‌چنین کنترل پدیده‌های شدید مورفولوژیکی توسط عوامل ساختاری (پایداری ناشی از پل به‌عنوان یک تکیه‌گاه مصنوعی در کنار تأثیرات پوشش گیاهی)، موجب شده است که سیستم به یک وضعیت تعادل دینامیکی تثبیت شده دست یابد و پتانسیل آن برای تغییرات ناگهانی و مخرب ژئومورفولوژیکی به حداقل برسد.



شکل ۷- تصاویر بازهٔ ۴ رودخانهٔ نیرچای در استان اردبیل

Fig.7. Images of Reach 4 of the Nirchai River in Ardabil Province



شکل ۸- تصاویر بازهٔ ۵ رودخانه نیرچای در استان اردبیل

Fig.8. Images of Reach 5 of the Nirchai River in Ardabil Province

نتایج ارزیابی شاخص کیفیت ژئومورفولوژیک در بازه ۶

بر اساس ارزیابی‌های انجام‌شده، بازه ششم رودخانه نیرچای، با طول ۶ کیلومتر، به‌عنوان طولانی‌ترین مقطع مطالعه شده، وضعیت پایداری ژئومورفولوژیکی بسیار نامطلوبی را نشان می‌دهد؛ این بازه با نوسان عرض کانال از ۵ تا ۳۰ متر، شاهد گسترش شدید پهنای جریان است که این امر، به‌ویژه در مقاطع شهری، اغلب ناشی از کاهش توانایی جریان برای حفظ پروفیل عرضی پایدار یا گسترش سطح در زمان عبور از محدودیت‌های هندسی است. شکل ۹ به وضوح نشان می‌دهد که این منطقه، تحت تأثیر بیش‌ترین و متراکم‌ترین مداخلات انسانی قرار دارد؛ نقطهٔ کانونی این اختلال، احداث پل در مرکز شهر نیر است که عملکرد رودخانه را به طور اساسی تغییر داده است. این دست‌کاری ساختاری منجر به فرآیندهای ژئومورفولوژیکی نامطلوبی شده است، از جمله تولید نقطه‌ای رسوب و انحراف مسیر جریان، که هر دو نشان دهندهٔ گسیختگی در تعادل دینامیکی سیستم است. این سطح از اختلال، مستقیماً با شاخص کمی پایداری بازتاب یافته است؛ هم‌چنین ضریب شاخص کیفیت ژئومورفیک در بازهٔ ۶ برابر با ۰/۴۳ است که آن را به طور قطع در طبقهٔ ضعیف قرار می‌دهد و این کمترین امتیاز ثبت شده در میان تمام بازه‌ها می‌باشد. این سطح پایین نشان می‌دهد که مداخلات مهندسی و ساخت‌وساز، که بر انتقال رسوب و سرعت جریان تأثیر می‌گذارند، مهم‌ترین عامل کاهش پایداری رودخانه در محیط‌های شهری هستند؛ این سیستم در حال حاضر از وضعیت تعادل خارج شده و به شدت مستعد فرسایش‌های فاجعه‌بار موضعی و تغییر شکل‌های نامطلوب در پاسخ به هرگونه تغییر ورودی هیدرولوژیکی یا رسوبی است.

نتایج ارزیابی پویایی ژئومورفولوژی رودخانه نیرچای با استفاده از روش MQI

تحلیل داده‌های شاخص‌ها در بازه‌های زمانی مختلف

با توجه به نتایج جدول ۳، داده‌های مربوط به نمرات شاخص‌های مختلف در بازه‌های زمانی متنوع، فرصت مناسبی برای بررسی روند تغییرات عملکرد شاخص‌ها، شناخت عوامل مؤثر بر بهبود یا کاهش کیفیت عملکرد استخراج شد. این تحلیل بر اساس داده‌های شش بازهٔ زمانی و نمرات اختصاص یافته به شاخص‌های F1 تا A12 صورت گرفته است. تا در نهایت شاخص کیفیت ژئومورفیک استخراج گردد.

تحلیل توصیفی و روند کلی داده‌ها

مجموع نمرات کلیه سؤالات در بازه‌های زمانی از ۵۳ در بازهٔ اول به ۸۲ در بازهٔ ششم افزایش یافته است. این روند صعودی بیانگر بهبود عملکرد کلی شاخص‌ها در طول زمان است. هم‌چنین مجموع نمرات کلاس C نیز از ۳۷ به ۵۷ ارتقاء یافته که تأییدکننده روند مثبت در شاخص کیفیت می‌باشد.

نوسانات شاخص‌ها در طول بازه‌ها متنوع است؛ برخی شاخص‌ها مانند A3 و A10 دارای نمرات پایدار و بالاتر در تمامی بازه‌ها بوده‌اند، که نشان‌دهندهٔ پایداری عملکرد مطلوب این شاخص‌هاست. در مقابل، برخی شاخص‌ها مانند F11 و F12 در بازه‌های انتهایی کاهش نمره قابل توجهی را تجربه کرده‌اند که نیازمند بررسی و پیگیری دقیق‌تر است.

تحلیل روند زمانی و تغییرات شاخص‌ها

با بررسی تغییرات نمرات در طول بازه‌های زمانی، مشاهده می‌شود که تعدادی از شاخص‌ها روند افزایشی معناداری داشته‌اند؛ برای مثال شاخص F7 از نمره صفر در بازهٔ اول، به پنج در بازه‌های بعدی افزایش‌یافته که نشانگر بهبود قابل توجه است. همچنین شاخص‌های کلیدی گروه A به‌خصوص A3 و A10 به‌طور مستمر نمرات بالایی کسب کرده‌اند که می‌تواند به عنوان عوامل کلیدی شاخص کیفیت ژئومورفیک تلقی شود.

این روند افزایشی حاکی از تأثیر مثبت اقدامات اجراشده یا عوامل محیطی در بهبود کیفیت شاخص‌ها است و می‌تواند مسیر توسعه برنامه‌های آتی را مشخص سازد.



شکل ۹- تصاویر بازهٔ ۶ رودخانه نیرچای در استان اردبیل

Fig.9. Images of Reach 6 of the Nirchai River in Ardabil Province

تحلیل همبستگی شاخص‌ها با عملکرد کلی

بررسی همبستگی بین نمرات هر شاخص و مجموع نمرات کلیه سؤالات و همچنین کلاس C نشان داده است که برخی شاخص‌ها مانند A3 ، A10 و F7 دارای همبستگی مثبت و قوی با عملکرد کلی هستند. این شاخص‌ها نقش محوری در بهبود عملکرد کلی ایفا می‌کنند و توجه ویژه به آن‌ها می‌تواند اثربخشی برنامه‌های ارتقا را افزایش دهد.

طبقه‌بندی شاخص‌ها و تحلیل خوشه‌ای

طبقه‌بندی شاخص‌ها بر اساس ویژگی‌های عملکردی و تغییرات زمانی، امکان شناسایی گروه‌های با ویژگی‌های مشابه را فراهم می‌سازد. تحلیل خوشه‌ای نشان داده است که: یک خوشه شامل شاخص‌های با عملکرد بالا و روند افزایشی مانندA10, A3 وF7 ؛ خوشه‌ای با شاخص‌های دارای نمرات متوسط و نوسان محدود و خوشه‌ای متشکل از شاخص‌های با عملکرد پایین یا نوسانات شدید شامل شد (جدول ۳).

جدول ۳- امتیازدهی به بازه‌ها در رودخانه نیرچای بر اساس شاخص‌های مورد استفاده در روش MQI

Table 3- Scoring of the reaches along the Nirchai River based on the indices used in the MQI method

بازه‌ها Reaches / شاخص‌ها Indicators	بازه ۱ Reache1	بازه ۲ Reache 2	بازه ۳ Reache 3	بازه۴ Reache 4	بازه ۵ Reache 5	بازه۶ Reache 6
F1	0	3	3	0	3	3
F2	5	5	5	5	3	5
F3	3	3	0	0	5	5
F4	3	2	2	2	3	2
F5	0	2	3	3	2	2
F6	0	5	0	0	3	5
F7	0	5	5	5	5	5
F8	3	3	3	3	3	3
F9	3	3	3	3	5	5
F10	6	2	6	2	2	0
F11	3	0	3	3	0	0
F12	3	0	3	3	0	0
F13	5	5	5	5	5	0
A1	6	3	3	3	3	6
A2	0	6	0	0	0	3
A3	6	6	6	6	6	3
A4	0	4	0	0	4	4
A5	0	2	0	2	0	3
A6	0	3	0	3	3	6
A7	0	3	0	3	3	3
A8	2	2	2	3	3	3
A9	0	3	0	0	3	6
A10	3	6	3	3	6	3
A11	2	2	0	2	2	2
A12	0	2	0	2	5	5
مجموع نمرات کلیه سؤالات Total marks of all questions	53	65	55	51	72	82
مجموع نمرات کلاس C Total marks of class C	37	35	36	33	41	57

جمع‌بندی امتیازات و ارزیابی وضعیت بازه‌ها در رودخانه نیرچای

بر اساس نتایج حاصله از جدول ۴، بازۀ ۲ با ضریب ۰/۸۵ دارای بالاترین ضریب و از نظر دینامیک ژئومورفولوژی دارای پویایی بیش‌تری نسبت به سایر بازه‌ها است. بازه ۱ و ۶ با ضریب ۰/۴۳ از نظر دینامیک ژئومورفولوژی در وضعیت بسیار ضعیف قرار دارد. بازۀ ۵ نیز با مقدار ضریب ۰/۷۵ در ردۀ خوب پویایی مناسبی قرار دارد. هم‌چنین بازۀ ۳ و ۴ در ردۀ متوسط قرار دارند.

جدول ۴- محاسبه مقادیر MQI برای بازه‌های مورد مطالعه در رودخانه نیرچای

Table 4- Calculation of MQI values for the studied reaches of the Nirchai River

بازه Reaches	بازه ۱ Reache 1	بازه ۲ Reache 2	بازه ۳ Reache 3	بازه۴ Reache 4	بازه ۵ Reache 5	بازه ۶ Reache 6
MQI	۰/۴۳	۰/۸۵	۰/۵۲	۰/۵۴	۰/۷۵	۰/۴۳
کیفیت	ضعیف	خیلی خوب	متوسط	متوسط	خوب	ضعیف
Quality	Poor	Very good	Average	Average	Good	Poor

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به ارزیابی کیفیت ژئومورفولوژیکی و پایداری رودخانه نیرچای با استفاده از شاخص (MQI)، پرداخته شده است. بنابراین نتایج حاصل از بازدیدهای میدانی، تصاویر ماهواره‌ای و ارزیابی بازه‌های شش‌گانه رودخانه نیرچای، به وضوح نشان داد که پویایی ژئومورفولوژیکی این سیستم تحت تأثیر نوسانات فضایی قابل توجه در شرایط طبیعی و اثرات مخرب مداوم مداخلات انسانی قرار دارد. شاخص کیفیت ژئومورفیک به‌عنوان ابزار اصلی سنجش، یک توزیع عملکردی بسیار ناهمگن را در طول رودخانه ترسیم می‌کند که این امر لزوم تفکیک مسیر رودخانه به واحدهای مدیریتی متمایز را تأکید می‌نماید. در یک‌سوی طیف، بازه دوم با کسب بالاترین پایداری با مقدار ۰/۸۵در رده کیفیت خیلی خوب قرار می‌گیرد. این بازه نمایانگر یک رژیم هیدروژئومورفولوژیکی بهینه شده است؛ جایی که عوامل تثبیت‌کننده طبیعی توانسته‌اند بر فرسایش غلبه کنند و سیستمی با ظرفیت خودتنظیمی بالا ایجاد نمایند، که این وضعیت عمدتاً ناشی از تأثیر سازه‌هایی است که جریان‌های اوج را تعدیل کرده‌اند. در نقطهٔ مقابل این پایداری، بازه‌های اول و ششم با ضریب برابر ۰/۴۳ (وضعیت ضعیف)، آسیب‌پذیری ذاتی سیستم را در برابر نیروهای دینامیکی غالب در آن مقاطع نشان می‌دهند. محور اصلی این تحلیل، نقش تخریبی دخالت‌های انسانی است. در حالی که برخی مداخلات، همچون در بازهٔ پنجم با مقدار ۰/۷۵ در رده خوب، توانسته‌اند با کمک عوامل بیولوژیکی و تثبیت کناره‌ها به یک تعادل شبه‌پایدار دست یابند، بازهٔ ششم به طور مشخص گویای گسست کامل تعادل دینامیکی است. این بخش، به دلیل تمرکز بالای سازه‌های ساختمانی در محیط شهری، دچار گسترش شدید عرض کانال و تبدیل شدن به کانون تولید رسوب شده است، وضعیتی که سیستم را در معرض خطر بالای فرسایش‌های منطقه‌ای قرار می‌دهد. در نهایت، علیرغم اینکه روند کلی تغییرات در طول زمان نشان دهندهٔ یک بهبود تجمعی در عملکرد پارامترها است، این بهبود کلی نتوانسته است بر ضعف‌های فضایی حاد تأثیر قابل ملاحظه‌ای بگذارد. بنابراین، نتیجه‌گیری نهایی این است که دستیابی به مدیریت پایدار رودخانه نیرچای منوط بر گذار از راهکارهای عمومی به برنامه‌های مداخله هدفمند فضایی است؛ برنامه‌هایی که اولویت اصلی آن‌ها معطوف به خنثی‌سازی اثرات مخرب سازه‌های موجود بر انتقال رسوب و احیای ظرفیت خودتنظیمی در بخش‌هایی با کمترین امتیاز پایداری خواهد بود. این رویکرد دوگانه برای تضمین بقای بلندمدت سیستم در برابر تغییرات آتی هیدرولوژیکی امری حیاتی است. این پژوهش مشابهت فراوانی با پژوهش میرزائی و همکاران (Mirzaei et al., 2024) دارد؛ زیرا در این پژوهش نیز توسعهٔ شهری و دخالت‌های مصنوعی باعث شده بیش‌تر بازه‌های رودخانه از نظر کیفیت ژئومورفولوژیکی در رده‌های «ضعیف» و «خیلی ضعیف» قرار گیرند و تنها دو بازه که مسیر طبیعی‌تری داشتند، موفق به کسب امتیاز «متوسط» شده‌اند. در نتیجه برای مدیریت پایدار رودخانه نیرچای، لازم است مدیران منابع آب و توسعه شهری مداخلات خود را در بازه‌های ۱ و ۶ رودخانه نیرچای متوقف کنند و تمام منابع را به پروژه‌های مهندسی بیولوژیکی هدفمند برای تثبیت رسوب و احیای ظرفیت خودتنظیمی در این بخش‌های بحرانی اختصاص دهند. اقدام عملیاتی باید شامل توقف هر گونه ساخت‌وساز جدید در حریم رودخانه و آغاز فاز اول پروژه‌های مهندسی بیولوژیکی برای تثبیت دیواره‌ها در این دو بازه باشد.

References

Ahmadi, M., Karam, A., & Hajehforoshnia, S. (2025). Morphological quality analysis of urban river corridor of Zayandeh Rood in Isfahan using the MQI method (from Najvan Park to Ashkavand Bridge). *Environmental Erosion Research Journal*, *14*(4), 96-118. http://dx.doi.org/10.61186/jeer.14.4.96

Allan, J. D., Castillo, M. M., & Capps, K. A. (2021). Fluvial Geomorphology. In: *Stream Ecology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61286-3_3

Downs, P. W., & Piégay, H. (2019). Catchment-scale cumulative impact of human activities on river channels in the late Anthropocene: implications, limitations, prospect. *Geomorphology*, *338*, 88-104. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.021

Downs, P., & Gregory, K. (2014). *River channel management: towards sustainable catchment hydrosystems*. Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203770344

Dufour, S., & Piégay, H. (2009). From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits. *River Research and Applications*, *25*(5), 568-581. https://doi.org/10.1002/rra.1239

Esfandyari Darabad, F., & Nezafat-Takleh, B. (2023). Evaluation and analysis of neotectonic activities and seismic potential of faults (Case study: Nir watershed). *Geography and Human Relations*, *5*(4), 568–589. [in Persian] https://doi.org/10.22034/gahr.2023.393039.1844

Felisia, O. R. M., Sternberg, M., Ratner, T., Drori, E., & Egozi, R. (2022). Customizing the Morphological Quality Index (MQI) for the assessment of streams in Eastern Mediterranean ecosystems. *Environmental Challenges*, *9*(10), 100612. https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100612

Fendereski, N., Masoudian, M., & Klaus, R. (2022). Evaluating the hydromorphological condition of Tajan River using HMQI Method. *Journal of Watershed Engineering and Management*, *14*(2), 185-201. [in Persian] https://doi.org/10.22092/ijwmse.2021.353586.1881

Gündüz, O., & Şimşek, C. (2021). Assessment of river alteration using a new hydromorphological index. *Environ Monit Assess*, *193*, 226. https://doi.org/10.1007/s10661-021-09018-w

Guo, W., Zhou, H., Jiao, X., Huang, L., & Wang, H. (2022). Hydrologic regime alteration and influence factors in the Jialing River of the Yangtze River, China. *Science of the Total Environment*, 807, 150902. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150902

Hajdukiewicz, H., Wyżga, B., Zawiejska, J., Amirowicz, A., Oglęcki, P., & Radecki-Pawlik, A. (2017). Assessment of river hydromorphological quality for restoration purposes: an example of the application of RHQ method to a Polish Carpathian river. *Acta Geophysica*, *65*(3), 423-440. https://doi.org/10.1007/s11600-017-0044-7

Hasenmueller, E. A., & Robinson, H. K. (2016). Hyporheic zone flow disruption from channel linings: Implications for the hydrology and geochemistry of an urban stream, St. Louis, Missouri, USA. *Journal of Earth Science*, *27*(1), 98-109. https://doi.org/10.1007/s12583-016-0632-5

Ilanloo, M. (2025). Evaluation of River Hydromorphology Using the Morphological Quality Index (MQI): A Case Study of the Megun–Fasham River Section. *Revista Brasileira De Engenharia De Biossistemas*, 19. https://doi.org/10.18011/bioeng.2025.v19.1251

Ilanloo, M., & Karam, A. (2020). Assessment of hydromorphological conditions of the river using the MQI method (Case study area: JAJROOD River). *Applied Researches in Geographical Sciences*, *20*(56), 35-53. [in Persian] http://dx.doi.org/10.29252/jgs.20.56.35

Mirzaei, N., Ahmadabadi, A., Eftekhari, S., & Lotfi, A. (2024). Evaluation and zoning of the geomorphological quality of the Vardavard River in Tehran. *Applied Researches in Geographical Sciences*, *24*(75), 196–213. [in Persian] http://dx.doi.org/10.61186/jgs.24.75.25

Nezafat Takleh, B., Esfandyari Darabad, F., Mostafazadeh, R. & Abedini, M. (2025). Evaluation and analysis of hydromorphological conditions of the Qorichay River in Ardabil Province using the morphological quality index. (e231233). *Journal of Urban and Regional Sustainable Development Studies* (*JSURDS*), e231233. [in Persian] https://www.srds.ir/article_231233.html?

Nosrati, K., Rostami, M., & Etminan, Z. (2020). Assessment of Taleghan River Hydrogeomorphological Conditions Using Morphological Quality Index. *Hydrogeomorphology*, *6*(21). 133-154. [in Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23833254.1398.6.21.7.2

Rein Moshe, F., Sternberg, M., Ratner, T., Drori, I., & Egozi, R. (2022). Customizing the Morphological Quality Index (MQI) to evaluate streams in Eastern-Mediterranean ecosystems. *Environmental Challenges*, *9*, 100612. https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100612

Rezaei, M., Khaleghi, S., & Hosseinzadeh, M., M. (2022). The Evaluation of Hydromorphological Conditions of Taleghan River Using MQI and RQI Methods for Environmental Planning. *Geography and Enviromental Sustainability*, *12*(4), 101-117. [in Persian] https://doi.org/10.22126/ges.2022.7973.2548

Rinaldi, M., Belletti, B., Van deBund, W., Bertoldi, W., Gurnell, A. M., & Buijse, T. (2013). *Restoring rivers for effective catchment management: D1.1 review on eco-hydromorphological methods*. Reform Deliverable 1.1, 1–109. https://www.researchgate.net/publication/282283692_Review_on_ecohydromorphological_methods

Rinaldi, M., Gurnell, A. M., Del Tánago, M. G., Bussettini, M., & Hendriks, D. (2016). Classification of river morphology and hydrology to support management and restoration. *Aquatic sciences*, *78*(1), 17-33. https://doi.org/10.1007/s00027-015-0438-z

Talebi, Z., Ayyoubzadeh, S. A., Mostafavi, H., Hosseinzadeh, M. M., & Shafizadeh, H. (2024). Morphological Analysis and Assessment of a River Based on Morphological Characteristics, Artificial Structures and Channel Adjustment (Case Study: Talar River - Upstream of the Shirgah). *Advanced Environmental Sciences*, *22*(1), 21-38. [in Persian] https://doi.org/10.48308/envs.2023.1250

Vol. 15, No. 1, Spring 2026, p. 72-95 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2026.97067.1633 OPEN ACCESS

Assessment of Land Subsidence in the Marand Plain Using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)

Shahram Roostaei [1]*, Seyyed Asadullah Hejazi [1], Davood Mokhtari [1], Davood Amani [1]

[1] Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 21 October 2025

Revised: 19 January 2025

Accepted: 24 January 2025

Available Online:

26 January 2025

Keywords:

Land Subsidence

Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)

Groundwater

Ground Deformation

Sentine1-1

ABSTRACT

This paper aimed to assess land subsidence in the Marand Plain using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) and to investigate the factors influencing its occurrence. Processing of radar images over the period 2020–2024 revealed that subsidence rates in the plain ranged from zero to a maximum of 3.745 cm over four years, with an average of approximately −1.723 cm. The spatial distribution of subsidence follows a heterogeneous but continuous pattern, with more than 70% of the plain's area falling within moderate to high subsidence classes. Analysis of the driving factors indicated that groundwater level decline is the primary trigger of subsidence, reaching over 10 meters in the southeastern and western parts of the plain. Additionally, aquifer characteristics such as considerable thickness (up to 282 m), dominance of fine-grained clay and silt sediments (especially in the western half), reduced natural aquifer recharge (due to climatic and hydrological droughts), gentle terrain slopes, and human activities such as irrigated agriculture and land-use change, are other factors exacerbating subsidence in the region. Accuracy assessment of the method using the ROC curve, Area Under the Curve (AUC = 0.949), and Gini coefficient (GC = 0.898) indicates excellent model performance. The findings highlight the critical condition of land subsidence in the Marand Plain, particularly in its western half, emphasizing the urgent need for management strategies such as controlling groundwater extraction, enhancing artificial aquifer recharge, revising cropping patterns, and implementing efficient irrigation practices.

* Corresponding author: Shahram Roostaei E-mail address: roostaei@tabrizu.ac.ir

How to cite this article: Roostaei, S., Hejazi, S. A., Mokhtari, D., & Amani, D. (2026). Assessment of Land Subsidence in the Marand Plain Using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 15*(1), 72-95. https://doi.org/10.22067/geoeh.2026.97067.1633

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Land subsidence is defined as the downward vertical displacement of the ground surface, which typically occurs as a result of susceptible geological conditions and under the influence of various environmental, hydrogeological, and economic changes and factors (Batubara et al., 2023). This phenomenon may have natural or anthropogenic origins and is consistently associated with significant concerns due to the reduction in aquifer storage capacity (Jiang et al., 2023). As one of the major environmental and engineering challenges in arid and semi-arid regions of the world, land subsidence mainly results from declining groundwater levels caused by excessive extraction, climate change, and geological factors. Iran, due to its heavy reliance on groundwater resources and exposure to prolonged droughts, has been increasingly affected by this phenomenon. The Marand Plain, as one of the important and densely populated plains of East Azerbaijan Province, is at risk of land subsidence due to excessive groundwater withdrawal, reduced natural recharge of the aquifer, and susceptible geological characteristics. This study aims to analyze the mechanisms and identify the factors influencing land subsidence in the Marand Plain using an integrated approach.

Material and Methods

This paper was conducted using an integrated and multidisciplinary methodological framework. The core of the methodology was based on Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technology. For this purpose, a series of Sentinel-1 radar satellite images covering a four-year period from 2020 to 2024, with a four-month revisit interval, were utilized. Image processing was carried out in a specialized software environment and involved several steps: (1) generation of interferometric pairs through precise geometric registration and co-registration of master and slave images; (2) removal of topographic phase effects using a high-resolution Digital Elevation Model (DEM); (3) correction of atmospheric delay using atmospheric model data; (4) phase filtering to reduce noise and enhance the signal-to-noise ratio; (5) phase unwrapping; and finally, (6) conversion of relative satellite line-of-sight (LOS) displacement into absolute vertical ground surface displacement. The output of this process consisted of annual and cumulative land subsidence rate maps with millimeter-level accuracy.

To complement and validate the satellite-based analyses, a Geographic Information System (GIS) was employed as an integrated platform for data integration, spatial analysis, and visualization of various information layers. Hydrogeological data, including groundwater table levels from piezometric wells over a ten-year period, groundwater contour maps and water-level change maps, aquifer thickness layers, and quantitative sedimentary characteristics of the aquifer environment, were imported into and processed within the GIS environment. In addition, field observations using a three-frequency GPS device were conducted at control points across the plain to validate the InSAR results. The accuracy of the InSAR method was quantitatively evaluated using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve, calculation of the Area Under the Curve (AUC), and the Gini coefficient.

Results and Discussion

The results of satellite monitoring showed that land subsidence has extensively affected the entire Marand Plain, with varying degrees of intensity. Over the four-year period, subsidence rates ranged from zero to a maximum of −3.745 cm over four years, with an average subsidence of approximately −1.723 cm for the entire plain. Subsidence zonation analysis indicated that only about 9.5% of the plain falls within the very low subsidence class, while the moderate, high, and very high classes together cover nearly 70% of the plain’s total area. The most high-risk zones are concentrated in the western half and parts of the southeastern sector of the plain, and major cities such as Marand, Koshksaray, and New Bonab are located within areas experiencing moderate to high subsidence rates.

The main driving factor of land subsidence was identified as the severe and continuous decline in groundwater levels. The average groundwater table drop over the past decade was −4.67 m, reaching more than 10 m in critical hotspots in the southeastern and western parts of the plain. The significant spatial overlap between areas with the greatest groundwater decline and zones with the highest subsidence rates confirms a direct causal relationship between these two phenomena. In addition, intrinsic aquifer characteristics - including considerable thickness (up to 282 m) and fine-grained sediments (especially clay and silt layers) - together with reduced natural aquifer recharge and human activities such as the expansion of water-intensive irrigated agriculture, have contributed to the intensification of subsidence in the western half of the plain.

Conclusion

This study demonstrates that the Marand Plain particularly its western and southeastern areas—is in a critical condition with respect to land subsidence. The continuation of current groundwater exploitation trends and the lack of effective management intervention could lead to irreversible damage to the environment, infrastructure, and human communities. Accordingly, immediate and comprehensive action is required, including integrated and sustainable groundwater resource management, implementation of artificial aquifer recharge programs, fundamental revision of agricultural and irrigation patterns, incorporation of hazard considerations into development planning, and continuous monitoring of subsidence-prone areas. These measures are proposed as key strategies to mitigate this crisis and move toward environmental resilience in the Marand Plain. The methodology employed in this research, with an AUC value of 0.949 and acceptable agreement with field observations, confirms the high reliability of the results.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۹۵-۷۲

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2026.97067.1633 دسترسی آزاد

ارزیابی فرونشست دشت مرند با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR)

شهرام روستایی[1*]، سیداسدالله حجازی[1]، داود مختاری[1]، داوود امانی[1]

[1] گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۴

کلمات کلیدی:

فرونشست زمین

تداخل‌سنجی راداری (InSAR)

آب زیرزمینی

تغییر شکل سطح زمین

سنتینل-۱

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی فرونشست زمین در دشت مرند، با کاربست تداخل‌سنجی راداری (InSAR) و بررسی عوامل مؤثر بر بروز آن انجام شده است. پردازش تصاویر راداری در بازهٔ زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ نشان داد که نرخ فرونشست در این دشت بین صفر تا حداکثر ۳/۷۴۵ سانتی‌متر در چهار سال متغیر بوده و میانگین آن حدود ۱/۷۲۳- سانتی‌متر است. توزیع فضایی فرونشست از الگوی ناهمگن ولی پیوسته‌ای پیروی می‌کند، به‌طوری که بیش از ۷۰ درصد مساحت دشت در کلاس‌های فرونشست متوسط به بالا قرار دارد. تحلیل عوامل مؤثر نشان داد که افت سطح آب زیرزمینی مهم‌ترین عامل محرک فرونشست است. این افت در مناطق جنوب‌شرقی و نیمه غربی دشت به بیش از ۱۰ متر نیز رسیده است. علاوه بر این، ضخامت زیاد آبخوان (تا ۲۸۲ متر)، غلبه رسوبات ریزدانه رسی و سیلتی (به‌ویژه در نیمه غربی)، کاهش تغذیه طبیعی آبخوان (ناشی از خشکسالی اقلیمی و هیدرولوژیکی)، شیب کم زمین و فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی آبی و تغییر کاربری اراضی، از دیگر عوامل تشدیدکننده فرونشست در منطقه هستند. ارزیابی دقت روش با استفاده از منحنی ROC و محاسبه مساحت زیر منحنی (AUC=0.949) و ضریب جینی (GC=0.898) نشان‌دهندهٔ عملکرد بسیار خوب مدل مورد استفاده است. یافته‌های پژوهش حاکی از وضعیت بحرانی فرونشست در دشت مرند به‌ویژه در نیمه غربی آن است و لزوم اتخاذ راهبردهای مدیریتی فوری از جمله کنترل برداشت آب زیرزمینی، افزایش تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها، اصلاح الگوی کشت و به‌کارگیری روش‌های آبیاری کارآمد را بیش از پیش نمایان می‌سازد.

مقدمه

فرونشست زمین به‌صورت جابه‌جایی عمودی رو به پایین سطح زمین تعریف می‌شود که معمولاً در نتیجه وجود شرایط زمین‌شناسی مستعد و تحت تأثیر تغییرات و عوامل گوناگون محیطی، هیدروژئولوژیکی و اقتصادی رخ می‌دهد (Batubara, Kooy

* نویسنده مسئول: شهرام روستایی

Email: roostaei@tabrizu.ac.ir

& Zwarteveen, 2023). این پدیده می‌تواند منشأ طبیعی یا انسانی داشته باشد و به دلیل کاهش ظرفیت ذخیره آبخوان‌ها، همواره با نگرانی‌های قابل‌توجهی همراه است (Jiang, Zhang, Liu, Li & Fang, 2023). فرونشست زمین پیامدهایی همچون ایجاد ترک‌های زمین‌شناسی، شکل‌گیری فروچاله‌ها، آسیب به زیرساخت‌های عمرانی و افزایش خطر وقوع سیلاب را به دنبال دارد. بررسی آثار فرونشست زمین مستلزم توجه به مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت است. فرونشست طبیعی معمولاً با نرخی در حد چند میلی‌متر در سال رخ می‌دهد و ازاین‌رو، پیامدهای آن محدود بوده و عمدتاً در بازه‌های زمانی بسیار طولانی آشکار می‌شود. با این حال، حتی در صورت پایین بودن نرخ فرونشست، اثرات تجمعی آن در طول چند دهه می‌تواند به‌طور چشمگیری میزان آسیب‌پذیری مناطق را افزایش دهد (Melet et al., 2021). در مقابل، فرونشست ناشی از فعالیت‌های انسانی ممکن است ده‌ها تا بیش از صد برابر فرونشست طبیعی باشد و آثار آن در مدت‌زمان نسبتاً کوتاهی نمایان شود. فرونشست با شدت بالا تأثیرات قابل‌توجهی بر محیط‌زیست برجای می‌گذارد و پیامدهای جدی برای فعالیت‌های انسانی به همراه دارد. از جمله این پیامدها می‌توان به آسیب‌های سازه‌ای واردشده به تأسیسات زیرزمینی، زیرساخت‌های خطی نظیر خطوط لوله و راه‌آهن و همچنین نشست ساختمان‌ها اشاره کرد (Hu et al., 2009).

در سال‌های اخیر، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک و پرجمعیت، فراوانی و شدت پدیده فرونشست زمین به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافته و پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی گسترده‌ای را به همراه داشته است (El Kamali et al., 2021). در این میان، ایران به‌عنوان کشوری پهناور با مساحتی در حدود ۱/۶ میلیون کیلومتر مربع و جمعیتی نزدیک به ۸۵ میلیون نفر، با چالشی جدی در حوزهٔ مدیریت منابع آب زیرزمینی روبه‌رو است. رشد چهار برابری جمعیت طی شش دههٔ اخیر، توسعهٔ شتابان صنعتی و گسترش بی‌رویهٔ فعالیت‌های کشاورزی، فشار فزاینده‌ای بر منابع آبی کشور وارد کرده است. در پاسخ به افزایش تقاضا، برداشت بی‌رویه و ناپایدار از آب‌های زیرزمینی به رویه‌ای رایج تبدیل شده و در نتیجه، کاهش چشمگیر این منابع حیاتی را به دنبال داشته است. به بیان دیگر، میزان برداشت از ظرفیت تجدیدپذیری آب‌های زیرزمینی فراتر رفته و تعادل طبیعی چرخهٔ آب را مختل کرده است. این تنش آبی گسترده نه تنها جوامع انسانی را با مخاطرات جدی مواجه می‌سازد، بلکه موجب بر هم خوردن تعادل‌های زیست‌محیطی نیز می‌شود. ازاین‌رو، بررسی جامع و فوری پیامدهای افت سطح آب زیرزمینی از ابعاد مختلف، امری ضروری به شمار می‌رود (Haghshenas Haghighi & Motagh, 2024). در ایران، آب‌های زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب در بسیاری از مناطق محسوب می‌شوند و در عین حال، به‌کارگیری روش‌های سنتی و ناکارآمد در بخش کشاورزی نیاز آبی را تشدید کرده است. این شرایط منجر به بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی شده و افزایش تنش و فشار مؤثر در لایه‌های زمین را به دنبال دارد که در نهایت، فشردگی رسوبات و بروز پدیدهٔ فرونشست زمین را سبب می‌شود (Mohammady, Pourghasemi & Amiri, 2021).

مطالعات متعددی در سطح جهان به بررسی علل فرونشست زمین، روش‌های پایش، ارزیابی مخاطرات و ارائه راهکارهای مدیریتی این پدیده پرداخته‌اند. با توجه به گستردگی جغرافیایی فرونشست و پیامدهای جدی آن بر محیط‌زیست و اقتصاد، این پدیده به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم مطرح شده و نیازمند پژوهش‌های گسترده، انتقال فناوری و توسعه پایش‌های بین‌المللی است (Hu et al., 2009). در مطالعات مرتبط با فرونشست، مهم‌ترین مراحل شامل: (۱) شناسایی پهنه‌های در حال فرونشینی و تعیین نرخ فرونشست در نقاط مختلف، (۲) شناسایی عوامل مؤثر در وقوع فرونشست، و (۳) ارائهٔ راهکارهای مناسب برای کاهش نرخ فرونشست و مدیریت خسارات ناشی از آن می‌باشد (Asadzadeh, Kaki, Shakiba & Hosseinzadeh, Akbari, Javanshiri & Mohammadpour, 2023; Raei, 2016). در دو دههٔ اخیر، تکنیک‌های متنوعی برای شناسایی و ارزیابی فرونشست زمین توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های ترازیابی، سامانه‌های موقعیت‌یابی جهانی (GPS) و روش‌های ژئوتکنیکی اشاره کرد. این روش‌ها اغلب پرهزینه و زمان‌بر بوده و امکان پایش مداوم تغییرشکل‌های زمین را تنها در بخش محدودی از مناطق مستعد فرونشست فراهم می‌کنند. در مقایسه، فناوری InSAR به دلیل پوشش مکانی وسیع و دقت بالای خود، قابلیت شناسایی تغییرشکل‌های سطح زمین در مقیاس‌های گسترده‌تر را دارد و قادر است جابه‌جایی‌های کوچک تا بزرگ زمین را اندازه‌گیری کند

(Lin et al., 2009؛ Galloway & Burbey, 2011). تکنیک InSAR یا تداخل‌سنجی راداری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، یکی از روش‌های شناخته شده و گسترده برای پایش دقیق جابه‌جایی‌های سطح زمین است. اساس کار این روش بر اختلاف فاز بین حداقل دو تصویر راداری است که از موقعیت‌های مداری مختلف یا زمان‌های متفاوت به‌دست آمده است (Raspini et al., 2022). در سال‌های اخیر، فناوری InSAR از یک موضوع تخصصی محدود به ابزاری عملیاتی و کاربردی در مطالعات فرونشست تبدیل شده است (Hosseinzadeh et al., 2023؛ Azarm, Mehrabi & Nadi, 2023؛ Rostami, Entezari & Zakerinejad, 2023؛ Amiri, Momeni & Mirassi, 2023؛ Rajabi, Roostaei & Mataee, 2024؛ Ding, Jia, Di, Wu & Wei, 2021؛ Villaseñor-Reyes, Hernández-Madrigal & Figueroa-Miranda, 2022؛ Zhang, Ke, Shen, Lin & Wang, 2023؛ Guo et al., 2023؛ Ren, Gong, Gao & Zhao, 2024؛ Huang et al., 2025). در این پژوهش نیز برای برآورد فرونشست در محدودهٔ دشت مرند از تکنیک تداخل‌سنجی راداری استفاده شده است.

در سال‌های اخیر، استان آذربایجان شرقی با چالش‌های جدی در زمینهٔ منابع آب زیرزمینی مواجه بوده است. کاهش نزولات جوی، تداوم دوره‌های خشکسالی و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی سبب کاهش شدید سطح ایستابی و بروز خسارات جبران‌ناپذیری در اکوسیستم‌های طبیعی و زیرساخت‌های انسانی این استان شده است. یکی از پیامدهای مهم این وضعیت، فرونشست زمین در دشت‌های حاصل‌خیز استان است که در سال‌های اخیر به یکی از تهدیدات جدی محیط‌زیستی و ژئوتکنیکی تبدیل شده است. وجود تعداد بالای چاه‌های غیرمجاز در دشت‌های استان، به‌ویژه در دشت مرند، منجر به افت محسوس سطح آب زیرزمینی و فشردگی لایه‌های رسوبی شده است. این روند علاوه بر کاهش ظرفیت ذخیرهٔ آبخوان، خطر وقوع فرونشست زمین را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده است. دشت مرند به عنوان یکی از دشت‌های مهم و گستردهٔ آذربایجان شرقی، بخشی از حوضهٔ آبریز دریای خزر را تشکیل می‌دهد. این دشت از شمال‌شرق به منطقهٔ جلفا - دوزال، از شمال غرب به دشت هرزندات، از غرب به خروجی رودخانه‌های زنوزچای و زیلبیرچای و از جنوب به حوضهٔ آبریز دریاچهٔ ارومیه محدود می‌شود. محصور بودن این دشت میان ارتفاعات و شیب ملایم ۲ تا ۵ درصدی از دامنه‌ها به سمت مرکز، موجب تمرکز آب‌های زیرزمینی و در نتیجه حساسیت بیشتر آن نسبت به تغییرات هیدرولوژیکی شده است. دو رودخانهٔ زیلبیرچای و زنوزچای از مهم‌ترین منابع آب سطحی منطقه به‌شمار می‌روند. در سال‌های اخیر، برداشت بی‌رویهٔ آب از چاه‌های مجاز و غیرمجاز، کاهش تغذیهٔ طبیعی آبخوان و افت مستمر سطح ایستابی، شرایطی بحرانی را برای دشت مرند رقم زده است. تداوم این روند می‌تواند منجر به بروز پدیده‌ی فرونشست در مقیاس وسیع و خسارات سنگین به زیرساخت‌های عمرانی، اراضی کشاورزی و سکونتگاه‌های انسانی شود. با توجه به اهمیت اقتصادی و کشاورزی این دشت، شناسایی نواحی مستعد فرونشست و پایش تغییرشکل‌های سطح زمین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های سنتی پایش زمین مانند ترازیابی و اندازه‌گیری‌های زمینی، اگرچه دقیق هستند، اما به‌دلیل هزینهٔ بالا، پوشش مکانی محدود و زمان‌بر بودن، پاسخگوی نیازهای گستردهٔ مطالعاتی در این زمینه نیستند. در مقابل، استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (InSAR) به‌دلیل دقت بالا، پوشش مکانی وسیع و قابلیت ردیابی تغییرشکل‌های میلی‌متری سطح زمین، ابزاری کارآمد و نوین در شناسایی و پایش فرونشست محسوب می‌شود. بنابراین، در پژوهش حاضر تلاش شده است تا با بهره‌گیری از تکنیک ترکیبی InSAR و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، موقعیت‌های پتانسیل فرونشست در دشت مرند شناسایی گردد. همچنین، با تحلیل ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی، هیدرودینامیکی و روند برداشت از منابع آب زیرزمینی، علل اصلی بروز این پدیده مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت راهکارهایی برای مدیریت و کاهش نرخ فرونشست ارائه شود. هدف اصلی این تحقیق، ایجاد درکی جامع از وضعیت فعلی دشت مرند و ارائه‌ی راهکارهایی علمی برای پیشگیری از گسترش پدیده‌ی فرونشست در این منطقه است.

منطقهٔ مورد مطالعه

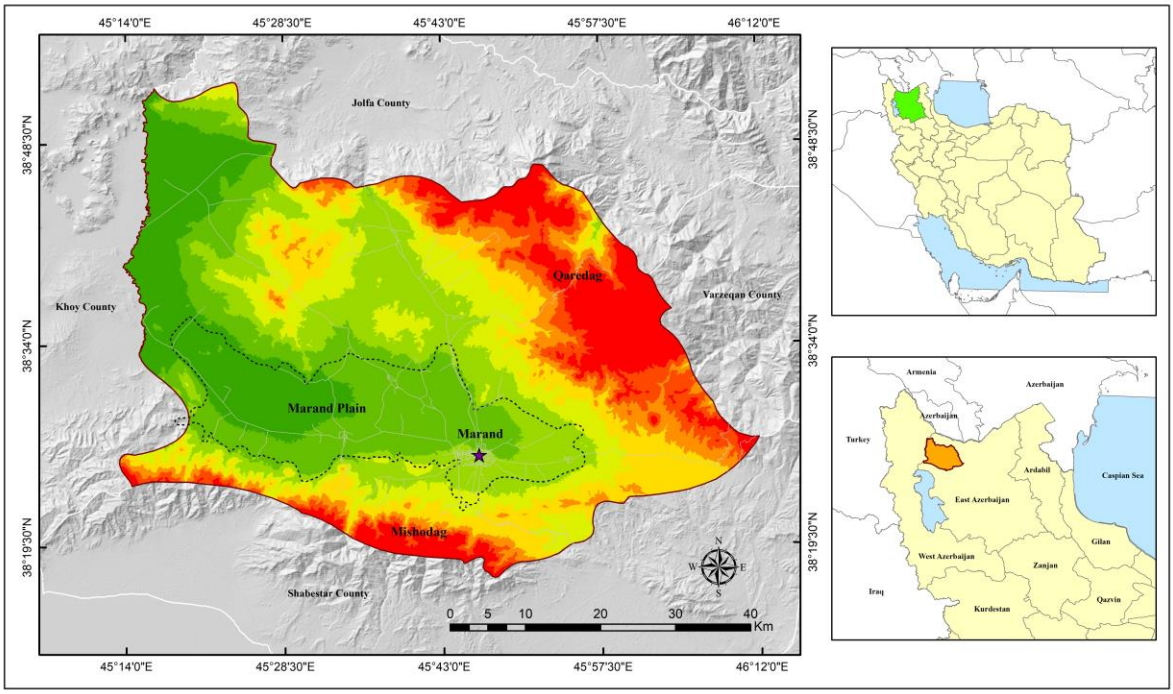
شهرستان مرند با مساحتی حدود ۲۹۳ کیلومترمربع در شمال‌غرب استان آذربایجان شرقی واقع شده است (شکل ۱). این شهرستان پس از تبریز و مراغه، سومین شهرستان بزرگ و پرجمعیت استان به‌شمار می‌رود. از نظر ویژگی‌های طبیعی، شهرستان مرند به دو واحد اصلی کوهستان و دشت تقسیم می‌شود. واحد کوهستان شامل رشته‌کوه‌های مورود‌اغ و میشوداغ در جنوب، و قره‌داغ در شمال شهرستان است. واحد دشت نیز بین این دو رشته‌کوه قرار گرفته و شامل مخروط‌افکنه‌ها و دشت‌های آبرفتی و سیلابی پایکوه‌هاست. رشته‌کوه قره‌داغ شمالی‌ترین و بزرگ‌ترین رشته‌کوه‌های آذربایجان است که از طریق فرورفتگی درهٔ ارس از کوه‌های قفقاز و ارمنستان جدا شده است. بخش عمدهٔ ساختار این رشته‌کوه از سنگ‌های آذرین تشکیل شده است. در جنوب شهرستان، رشته‌کوه میشوداغ- مورود‌اغ امتداد یافته است. این رشته‌کوه از غرب استان و شمال دریاچه ارومیه آغاز می‌شود و تا شمال غرب تبریز ادامه دارد. در این مسیر، به وسیله تپه‌های کم‌ارتفاع به کوه‌های شمال تبریز (عینالی) متصل می‌گردد که تا گردنهٔ شبلی امتداد می‌یابند. بلندترین نقطهٔ این رشته، قلهٔ علمدار با ارتفاع ۳۱۵۵ متر است. هستهٔ اصلی این کوه‌ها از سازندهای پرکامبرین و عمدتاً از جنس ریولیت تشکیل شده است.

دشت مرند میان رشته‌کوه‌های میشوداغ و قره‌داغ واقع شده و توسط رشته‌کوه میشو از دشت تبریز جدا می‌شود. این دشت با وسعتی حدود ۶۴۱۲۱ هزار هکتار (در این تحقیق) و ارتفاع متوسط ۱۳۰۰متر از سطح دریا، در بخش میانی شهرستان واقع شده است. دشت مرند پس از دشت‌های تبریز و مراغه، سومین کانون مهم جمعیتی استان آذربایجان شرقی محسوب می‌شود. برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، این دشت را در زمرهٔ دشت‌های مستعد فرونشست استان قرار داده است. علاوه بر دشت مرند، بخش‌هایی از دشت جلفا - دوزال نیز در محدودهٔ شهرستان قرار دارد. بخش قابل توجهی از دشت ائواوغلی نیز در غرب شهرستان واقع شده و از این طریق با شهرستان خوی در استان آذربایجان غربی اشتراکات طبیعی دارد. برخی از قسمت‌های غربی دشت مرند به دلیل تأثیر گنبدهای نمکی، شور شده و حاصلخیزی اندکی دارند. بخش عمدهٔ شهرستان مرند در حوزهٔ آبریز رودخانهٔ ارس (دریای خزر) قرار دارد و توسط شاخه‌های مختلف رودخانه زیلبرچای زهکشی می‌شود. همچنین بخش‌هایی از شمال و شمال‌شرق شهرستان توسط رودخانه‌های سیه‌رود و پهناور به ارس می‌ریزند. تنها بخش کوچکی از جنوب‌شرق شهرستان در محدودهٔ حوضهٔ آبریز دریاچه ارومیه واقع شده است.

مواد و روش‌ها

رادار دریچه مصنوعی[1](SAR) یک سیستم تصویربرداری مایکروویو محسوب می‌شود که قادر است از میان ابرها نفوذ کرده و داده‌های تصویری به دست آورد، زیرا از امواج مایکروویو استفاده می‌کند. این فناوری به عنوان یک سیستم فعال، قابلیت عملیات شبانه‌روزی را نیز داراست. یکی از ویژگی‌های برجسته این رادار، پیکربندی تداخل‌سنجی[2] آن (InSAR) است که امکان اندازه‌گیری دقیق مسیر حرکت امواج تشعشعی را با توجه به هم‌فاز بودن فراهم می‌کند. این اندازه‌گیری‌ها، بر اساس موقعیت ماهواره و زمان ثبت داده‌ها، به تولید مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM) و ارزیابی تغییر شکل‌های سانتی‌متری سطح زمین منجر می‌شود (Ferretti, Monti-Guarnieri, Prati & Rocca, 2007). به‌ویژه تکنیک تداخل‌سنجی (InSAR) مؤثر است؛ چرا که از اختلاف فاز میان تصاویر SAR ثبت‌شده از یک منطقه مشابه که در زمان‌های مختلف و تحت شرایط تصویربرداری و هندسی یکسان به دست می‌آیند، استفاده می‌کند. تکنیک‌های چندزمانی InSAR امکان نقشه‌برداری دقیق تغییرات سطحی و ساختاری را در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف فراهم می‌کنند. این قابلیت به تحلیل حرکات غیرمعمول و ارزیابی چالش‌های بالقوه مرتبط با پروژه‌های عمرانی در طول زمان کمک می‌نماید، و چنین تحلیلی با استفاده از سری‌های زمانی داده‌ها امکان‌پذیر است (Karimzadeh, Matsuoka & Ogushi, 2018).

1 - Synthetic Aperture Radar (SAR)
2 - Interferometric configuration



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت مرند در شمال غرب کشور

Fig. 1. Geographical location of the Marand Plain in northwestern of Iran

در این پژوهش، از تصاویر ماهواره‌ای راداری ماهواره سنتینل در بازهٔ زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ و با تکرار چهار ماهه استفاده شد. پردازش این تصاویر شامل مراحل ایجاد جفت‌های تداخلی، حذف اثرات جوی و توپوگرافی، فیلتر کردن نویزها و نهایتاً محاسبه نرخ تجمعی و میانگین جابه‌جایی در محیط نرم‌افزار ArcGIS بوده است. این روش به دلیل پوشش وسیع، دقت بالا، قابلیت پایش تغییرات در هر شرایط آب‌وهوایی و ارائهٔ داده‌های پیوسته مکانی، به عنوان ابزاری بسیار قدرتمند برای مطالعه پدیده‌هایی مانند فرونشست زمین مورد استفاده قرار گرفته است. بدین ترتیب، روش‌شناسی پژوهش متکی بر سنجش از دور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌باشد. پردازش‌های مورد نیاز در روش تداخل‌سنجی راداری را می‌توان به شرح زیر بیان داشت:

(۱) ثبت دو تصویر: در این مرحله دو تصویر SAR نسبت به یکدیگر ثبت هندسی می‌شوند. در این راستا، یک تصویر به عنوان تصویر اصلی و تصویر دوم به عنوان تصویر فرعی نام‌گذاری می‌شوند. برای ثبت هندسی دو تصویر، می‌بایست پیکسل‌های تصویر فرعی مطابق با پیکسل‌های تصویر اصلی هماهنگ و تنظیم شوند.

(۲) تشکیل اینترفراگرام و برآورد همبستگی تصاویر: در این مرحله، تداخل‌سنجی با ضرب متناظر دامنه و محاسبه اختلاف فاز بین تصاویر اصلی و فرعی ایجاد می‌شود. اختلاف فاز تصاویر، شامل پنج منبع مختلف می‌باشد که این اختلاف فازها عبارتنداز: فاز زمین مسطح، فاز توپوگرافی، فاز تغییر شکل سطح زمین، فاز اتمسفر و فاز نویز. در سایر مراحل باقی‌مانده برای پردازش InSAR همه فازها به غیر از تغییر شکل سطح زمین حذف می‌شوند. همچنین همبستگی بین دو تصویر، که نشان‌دهنده شباهت پیکسل‌های تصاویر اصلی و فرعی می‌باشد، در این مرحله محاسبه می‌شود.

(۳) حذف فاز توپوگرافی: در این مرحله، فاز توپوگرافی، با کم کردن یک مدل ارتفاع رقومی (DEM) مرجع از تداخل نگاشت پردازش شده، حذف می‌شود.

(۴) فیلتر کردن فاز: در این قدم، نسبت سیگنال به اغتشاش با فیلتر کردن فاز افزایش می‌یابد.

(۵) بازیابی فاز: این مرحله با بررسی اختلافات فاز بین پیکسل‌های مجاور، بین فاز تداخل‌نگاشت و جابه‌جایی ارتباط ایجاد می‌شود.

۶- تصحیح زمین: در این مرحله اختلاف فاز ناشی از زمین مسطح محاسبه و حذف می‌شود.

(۷) تبدیل خط دید (LOS) به جابه‌جایی عمودی: نتیجه مرحله تصحیح زمین، تصویری است که جابه‌جایی زمین در جهت خط دید را نشان می‌دهد. برای به دست آوردن جابه‌جایی عمودی، تصویر باید با توجه به زاویه برداشت تصویر سطح، تجزیه شود.

(۸) تبدیل جابه‌جایی نسبی به جابه‌جایی مطلق: با تصویر InSAR به دست آمده از مرحله قبلی، جابه‌جایی نسبی سطح زمین در جهت دید سنسور به دست می‌آید. سپس یک نقطه مرجع با احتمال جابه‌جایی کم با در نظر گرفتن سازگاری برآورد شده و اطلاعات موجود از منطقهٔ مورد نظر برای تبدیل مقادیر نسبی جابه‌جایی به مقادیر مطلق، انتخاب می‌شود. پس از تنظیم منطقه بدون جابه‌جایی، جابه‌جایی مطلق یا عمودی محاسبه می‌شود.

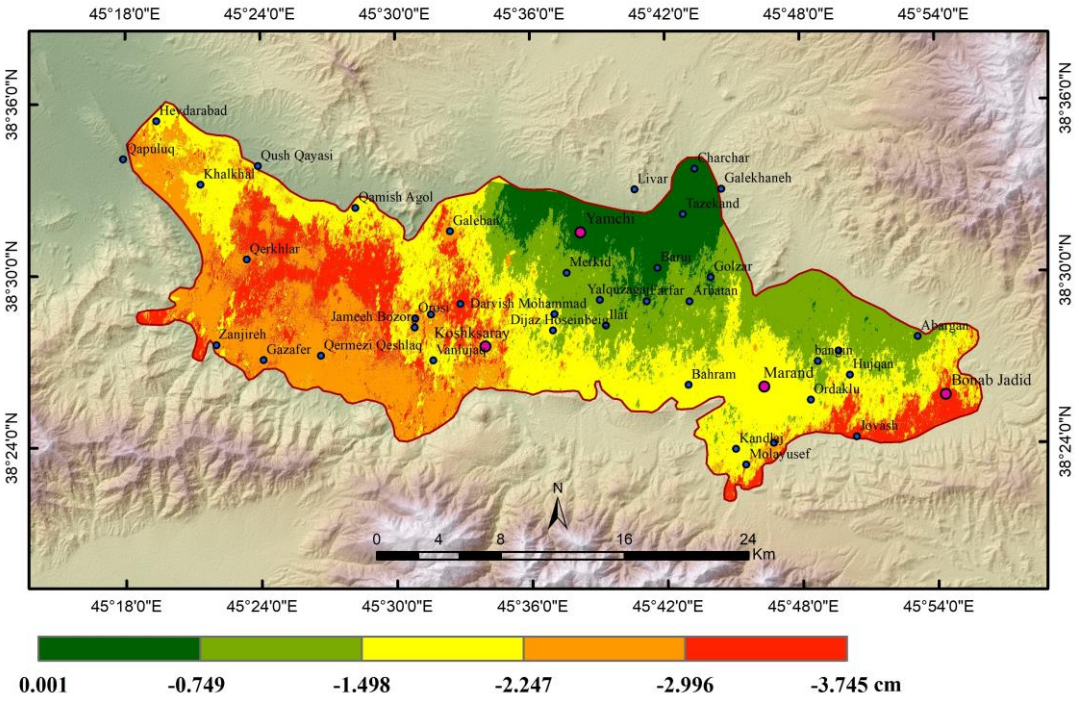
نتایج و بحث

پایش فرونشست با تکنیک تداخل‌سنجی راداری

تداخل‌سنجی راداری یک تکنیک پیشرفته سنجش از دور است که با مقایسه فاز دو یا چند تصویر راداری دریافتی از یک منطقه در زمان‌های مختلف، قادر به تشخیص و اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطح زمین در حد میلی‌متر تا سانتیمتر است. این روش بر اساس ایجاد یک تصویر تداخلی (اینترفروگرام) از اختلاف فاز بین دو تصویر عمل می‌کند. تغییرات فاز در اینترفروگرام ناشی از عوامل مختلفی چون تغییر شکل سطح زمین (مانند فرونشست)، تغییرات جوی و خطاهای مداری است. با فیلتر کردن و پردازش‌های دقیق، می‌توان اثر تغییر شکل زمین را استخراج نمود. در پژوهش حاضر نیز نقشه فرونشست دشت مرند با استفاده از روش‌شناسی مذکور تهیه گردید. نقشه به‌دست آمده (شکل ۲) تغییرات مکانی نرخ فرونشست را با دقت فضایی بالا و به صورت پیوسته نشان می‌دهد.

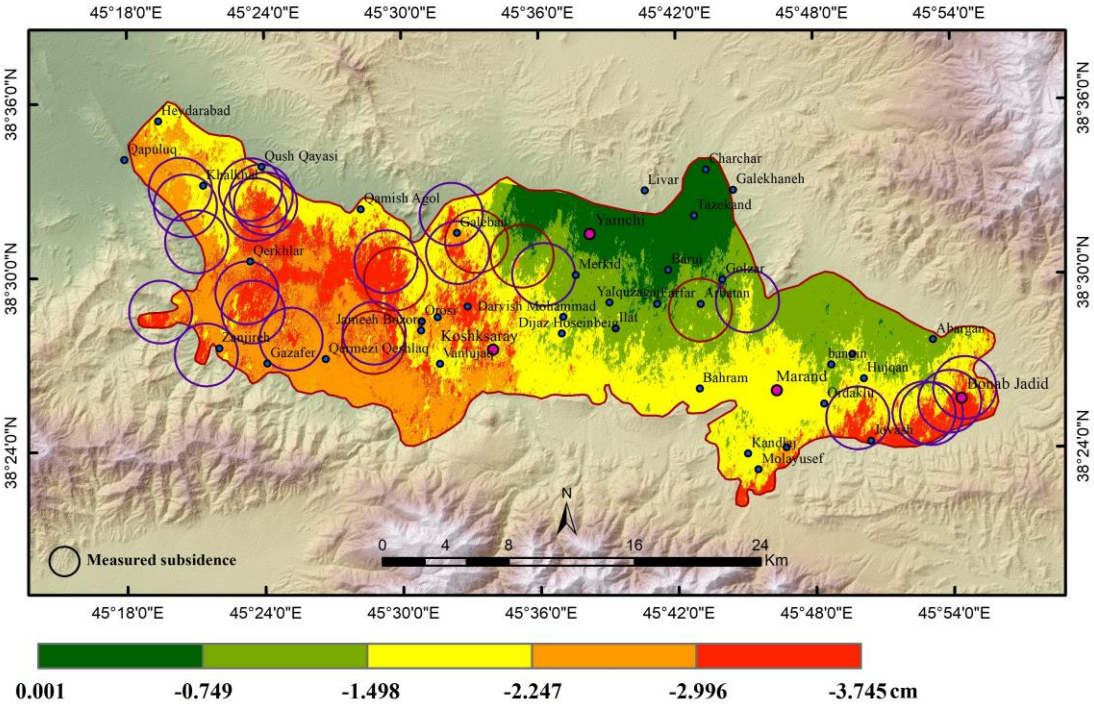
برای اطمینان از صحت و اعتبار نتایج حاصل از پردازش‌های سنجش از دور، از داده‌های میدانی جمع‌آوری شده با دستگاه GPS سه فرکانسه و نیز منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) بهره گرفته شد. تطابق قابل توجه بین پهنه‌های فرونشست شناسایی شده با تکنیک InSAR و موقعیت‌های اندازه‌گیری شده با GPS، دلیلی بر قابلیت اطمینان روش‌شناسی اتخاذ شده است (شکل ۳).

ارزیابی دقت روش با استفاده از منحنی ROC و شاخص AUC انجام شد (شکل ۴). منحنی ROC با مقایسهٔ تشخیص صحیح و نادرست، توان تفکیک آزمون را نشان می‌دهد؛ به طوری‌که انطباق منحنی با خط قطر بیانگر عملکرد تصادفی و فاصله گرفتن از آن (در بالای خط قطر) نشان‌دهندهٔ دقت بالاتر است. شاخص AUC معیار کلی سنجش دقت بوده و هرچه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، عملکرد آزمون بهتر ارزیابی می‌شود. همچنین ضریب جینی که از AUC محاسبه می‌شود، شاخص دیگری برای سنجش کارایی طبقه‌بندی است. نتایج به دست‌آمده برای دشت مرند با مقدار AUC برابر ۰/۹۴۹ و ضریب جینی ۰/۸۹۸، بیانگر عملکرد عالی و قدرت تشخیص بسیار بالای روش تداخل‌سنجی راداری در شناسایی پهنه‌های فرونشست است و قابلیت اتکای بالای نقشه‌های تولید شده را برای تحلیل‌ها و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی نشان می‌دهد.



شکل ۲- نقشهٔ فرونشست دشت مرند با کاربست تکنیک تداخل‌سنجی راداری (از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴)

Fig. 2. Land subsidence map of the Marand Plain using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technique (2020–2024)

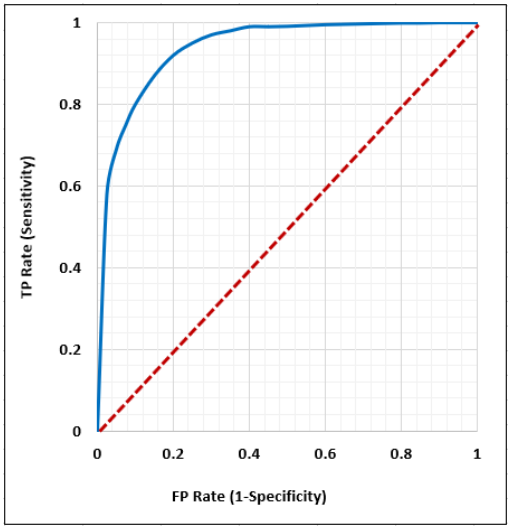


شکل ۳- پهنه‌های اندازه‌گیری فرونشست با استفاده از GPS سه فرکانسه در دشت مرند

Fig. 3. Subsidence measurement zones using a three-frequency GPS in the Marand Plain

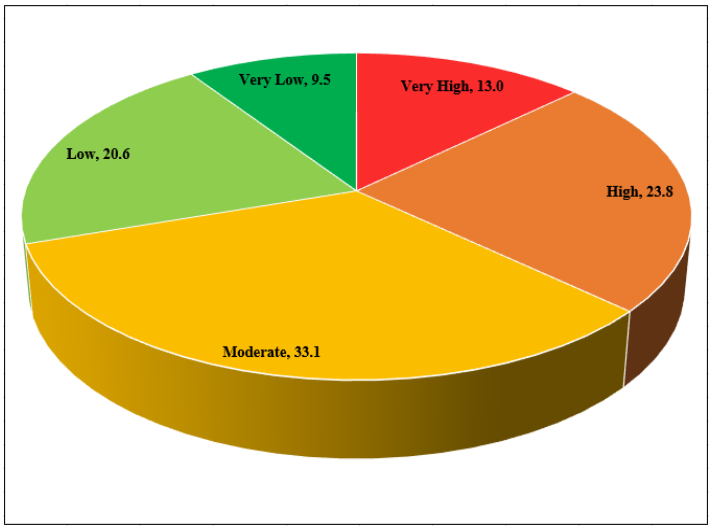
نتایج تحلیل‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که تقریباً کل گسترهٔ دشت مرند در معرض پدیدهٔ فرونشست، با شدت‌های متفاوت قرار دارد. نرخ فرونشست در این دشت در بازهٔ چهارسالهٔ مورد مطالعه، از صفر تا حداکثر ۳/۷۴۵- سانتی‌متر در سال متغیر بوده و میانگین پیکسلی آن برای کل دشت حدود ۱/۷۲۳- سانتی‌متر برآورد گردیده است. توجه به دو نکته اساسی، ابعاد نگران‌کنندهٔ این پدیده را آشکارتر می‌سازد: نخست آنکه این رقم میانگین برای کل پهنه وسیع دشت محاسبه شده و در بخش‌های قابل‌توجهی از آن، نرخ فرونشست به مراتب بیشتر است. دوم آنکه این رقم حاصل تنها چهار سال مشاهده است و در صورت تداوم روندهای کنونی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و عدم اجرای مدیریت یکپارچه، اثرات تجمعی فرونشست در بلندمدت می‌تواند به ارقامی بسیار چشمگیر و فاجعه‌بار منجر شود که خساراتی جبران‌ناپذیر بر محیط زیست، زیرساخت‌ها، سازه‌ها و فعالیت‌های اقتصادی - اجتماعی وارد خواهد کرد. در شکل ۵ مساحت هر یک از کلاس‌های فرونشست برحسب درصد ارائه شده است.

توزیع فضایی نرخ فرونشست در دشت مرند از الگوی ناهمگن ولی با پیوستگی نسبی برخوردار است. بخش‌های شمالی و شمال شرقی دشت، عمدتاً منطبق بر مخروط‌افکنه زنوزچای، با نرخ‌های فرونشست بسیار کم (کمتر از ۰/۷۴۹ سانتی‌متر) مشخص می‌شوند. این امر مخصوصاً در محدودهٔ شهر یامچی و روستاهای باروج، تازه‌کنداخوند و چرچر دیده می‌باشد. بر این اساس حدود ۹/۵ درصد از منطقهٔ مطالعاتی با مساحتی بالغ بر ۶۱۰۸ هکتار در کلاس با فرونشست بسیار کم قرار گرفته است. پهنه‌های با فرونشست کم (بین ۰/۷۴۹ تا ۱/۴۹۸ سانتی‌متر) که عمدتاً اراضی روستاهای مرکید، یالقوزآغاج، فارفار، ابرغان و و ارباتان را دربرمی‌گیرند، با سهمی حدود ۲۰/۶ درصدی (۱۳۲۰۵ هکتار)، حاشیه‌ای نسبتاً وسیع پیرامون مناطق با فرونشست بسیار کم ایجاد کرده‌اند. داده‌های GPS میدانی نیز نرخ پایین فرونشست در این پهنه‌ها را تأیید می‌کند. آنچه مشخص است فرونشست زمین در محدودهٔ دشت مرند به صورت پهنه‌های پیوسته بوده و به صورت تدریجی رخ داده است. بدین ترتیب، در محدوده‌ای مشخص، مجموعه‌ای از متغیرها باعث شده‌اند که فرونشست با نرخ کمتری اتفاق بیفتد و برعکس. این الگوی توزیع، حاکی از نقش مؤثر عواملی مانند تغذیهٔ بهتر آبخوان در مناطق بالادست و نزدیک به کوهپایه‌ها، بافت رسوبی درشت‌تر در مخروط‌افکنه‌ها، و کاهش فشار بهره‌برداری از آب زیرزمینی در این نواحی است.



شکل ۴- منحنی ROC روش‌شناسی تحقیق

Fig. 4. ROC curve of the study methodology



شکل ۵- مساحت کلاس‌های فرونشست در دشت مرند

Fig. 5. Area of land subsidence classes in the Marand Plain

بررسی‌ها نشان می‌دهد که بالغ بر ۳۳ درصد از گستره دشت مرند، معادل حدود ۲۱۲۰۹ هکتار، در طبقه‌بندی مناطق با نرخ فرونشست متوسط قرار دارد. داده‌های حاصل از مطالعات چهار سال گذشته نشان می‌دهد که دشت مطالعاتی در این پهنه‌ها در طی چهار سال گذشته بین ۱/۴۹۸ تا ۲/۲۴۷ سانتی‌متر نشست داشته است. این مقادیر بیانگر روندی محسوس و قابل‌توجه درکاهش ارتفاع سطح زمین در بخش‌هایی از دشت است. پراکنش این پهنه‌ها، عمدتاً در بین طبقات فرونشست کم تا زیاد قرار گرفته و الگوی فضایی آن‌ها روندی تقریباً شمال‌غربی - جنوب‌شرقی را دنبال می‌کند. این الگو نشان می‌دهد که فرونشست در دشت مرند محدود به نقاط پراکنده نیست، بلکه در قالب نوارهایی تمایل به امتداد یافتن در طول این محور جغرافیایی را دارد. شهر مرند به عنوان بزرگ‌ترین و مهم‌ترین مرکز جمعیتی و اقتصادی این دشت، در دل همین پهنه با فرونشست متوسط واقع شده است. قرارگیری شهر در این محدوده، اهمیت موضوع و ضرورت برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آب و کنترل مخاطرات زمین‌شناختی را دوچندان می‌کند. علاوه بر شهر مرند، بخش عمده‌ای از اراضی روستاهای حیدرآباد، خلخال، قوش‌قیه‌سی، قمیش آغل، وانلوجق، درویش‌محمد، دیزج حسین‌بیگ، بهرام، کندلج، اردکلو و هوجقان نیز در محدوده این کلاس قرار دارد. این گستردگی بیانگر آن است که فرونشست نه تنها نواحی شهری بلکه مناطق روستایی و اراضی کشاورزی را نیز تحت تأثیر قرار داده است. در نهایت، پیوستگی نسبی پهنه‌های این کلاس به خوبی نشان می‌دهد که نرخ فرونشست در دشت مرند ماهیتی تدریجی، پهنه‌ای و گسترده دارد؛ به عبارتی، این پدیده به‌صورت یک فرآیند آرام اما مداوم در حال پیشروی بوده و در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌تواند به یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی و توسعه‌ای منطقه تبدیل شود (شکل ۶).

در حالت تطبیقی، بالغ بر ۱۵۲۷۸ هکتار از اراضی دشت مرند در کلاس فرونشست زیاد قرار گرفته‌اند که این مقدار حدود ۲۳/۸ درصد از کل محدوده دشت را شامل می‌شود. نکته قابل توجه آن است که توزیع فضایی این کلاس عمدتاً با نیمه غربی دشت انطباق دارد و بررسی‌های چند سال اخیر نشان می‌دهد که این بخش از دشت با آهنگی بالا و نگران‌کننده در حال فرونشست است. چنین روندی می‌تواند نتیجه مجموعه‌ای از عوامل مختلف مانند افت شدیدتر سطح آب‌های زیرزمینی، محدود بودن تغذیه آبخوان در اثر خشکسالی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی، ویژگی‌های زمین‌شناسی و جنس سازندها، و نیز فعالیت‌های نوزمین‌ساختی باشد. بخش قابل توجهی از اراضی شهر کشکسرای در این پهنه قرار دارد و علاوه بر آن، تعدادی از روستاهای کوچک و بزرگ از جمله قاپولوخ، قرخلار، زنجیره، گزافر، قرمزی قشلاق، ارسی، جامعه بزرگ، قراجه فیض‌اله و گله‌بان نیز در محدوده کلاس فرونشست زیاد واقع شده‌اند. همچنین بخشی از اراضی روستاهای ملایوسف و دیزج علیا در جنوب‌شرق دشت نیز در این طبقه جای گرفته‌اند. تمرکز پهنه‌های دارای فرونشست زیاد و بسیار زیاد در وسعت قابل توجهی از نیمه غربی دشت، بیانگر وضعیت بحرانی این بخش‌هاست. ادامهٔ روند کنونی فرونشست می‌تواند پیامدهای جدی همچون کاهش شدید یا از بین رفتن ظرفیت نگهداری آب در بخش‌های وسیعی از دشت مرند، تخریب فونداسیون و نشست ساختمان‌ها، آسیب به زیرساخت‌های شهری و روستایی، تخریب چاه‌ها و زمین‌های کشاورزی را به دنبال داشته باشد؛ پیامدهایی که در نهایت می‌توانند تبعات اجتماعی، اقتصادی و حتی امنیتی گسترده‌ای برای منطقه ایجاد کنند.

در برخی از نواحی دشت مرند، فرونشست زمین با آهنگی بسیار بالا رخ داده و این مناطق در طبقه‌بندی پهنه‌بندی، تحت عنوان کلاس با فرونشست بسیار زیاد شناخته می‌شوند. حدود ۱۳ درصد از محدودهٔ دشت، معادل ۸۳۲۱ هکتار، در این کلاس قرار گرفته است. در این پهنه‌ها میزان فرونشست زمین بیش از ۲/۹۹۶ سانتی‌متر بوده که نشان‌دهندهٔ شدت و گستردگی قابل توجه این پدیده در بخش‌هایی از دشت است. الگوی توزیع فضایی این پهنه‌ها بیان می‌کند که مناطق دارای فرونشست بسیار زیاد عمدتاً در نیمهٔ غربی دشت و بخش‌هایی از نوار جنوب شرقی آن پراکنده شده‌اند. بخش قابل توجهی از اراضی شهر کشکسرای در نیمهٔ غربی دشت و همچنین اراضی شهر بناب جدید در جنوب شرقی دشت در این طبقه قرار دارند. افزون بر این، اراضی روستاهای قراجه‌محمد و جواش نیز در محدودهٔ همین پهنه‌ها واقع شده‌اند.

قرارگیری پهنه‌ها با فرونشست بسیار زیاد در مجاورت پهنه‌هایی با فرونشست زیاد موجب شده است که مناطق وسیعی از دشت به صورت یکپارچه در معرض نرخ‌های بالای فرونشست قرار گیرند؛ وضعیتی که خطرات و پیامدهای جدی را به دنبال خواهد داشت. این هم‌پوشانی فضایی، علاوه بر افزایش آسیب‌پذیری سکونتگاه‌ها و زیرساخت‌ها، می‌تواند تخریب اراضی کشاورزی، افت ظرفیت ذخیره آبخوان و تشدید مخاطرات زمین‌شناختی را به همراه داشته و چالش‌های اجتماعی - اقتصادی قابل توجهی را برای منطقه ایجاد کند.

الگوی توزیع ناهمگون فرونشست در دشت مرند را می‌توان ناشی از ترکیب پیچیده‌ای از عوامل زمین‌شناختی، هیدروژئولوژیکی و انسانی دانست. افت شدیدتر سطح آب‌های زیرزمینی در اثر برداشت بی‌رویه برای مصارف کشاورزی و شرب، کاهش تغذیه طبیعی آبخوان به دلیل توالی خشکسالی‌های اخیر، ضخامت و جنس رسوبات ریزدانه (مانند رس و سیلت) که قابلیت تراکم‌پذیری بالایی دارند، و احتمالاً تأثیرات فعالیت‌های نوزمین‌ساختی، از جمله مهم‌ترین دلایل تشدید فرونشست در نیمه غربی دشت به شمار می‌روند. تداوم این روند، علاوه بر کاهش شدید ظرفیت ذخیره‌سازی سفره‌های آب زیرزمینی، می‌تواند منجر به ایجاد ترک‌ها و شکاف‌های گسترده در سطح زمین، تخریب زیرساخت‌های حیاتی (مانند جاده‌ها، خطوط انتقال آب و نیرو، شبکه‌های آبیاری)، آسیب به فونداسیون ساختمان‌ها و سازه‌ها، کج‌شدگی و تخریب چاه‌های آب، و نهایتاً خسارت گسترده به اراضی کشاورزی گردد. این پیامدهای محیطی- مهندسی، به نوبهٔ خود، می‌تواند موجبات ناامنی غذایی، تشدید مهاجرت از روستاها، بروز تنش‌های اجتماعی و خسارات اقتصادی کلان را فراهم آورد. بنابراین، نتایج این پژوهش به وضوح هشدار می‌دهد که دشت مرند، به ویژه نیمهٔ غربی آن، در وضعیت آسیب‌پذیر و بحرانی نسبت به پدیدهٔ فرونشست قرار دارد و اتخاذ فوری راهبردهای مدیریتی یکپارچه، شامل کنترل و نظارت بر برداشت از آب‌های زیرزمینی، تغذیهٔ مصنوعی آبخوان‌ها، بازچرخانی آب، و اصلاح الگوی کشت، برای جلوگیری از فاجعه زیست‌محیطی و انسانی ضروری است.



شکل ۶- شواهد میدانی فرونشست در دشت مرند

Fig. 6. Field evidences of land subsidence in the Marand Plain

ارزیابی سطح ایستابی

برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و افت سطح ایستابی، امروزه به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین و تأثیرگذارترین عوامل بروز پدیده فرونشست زمین شناخته می‌شود. این مسئله به‌ویژه در دشت‌های خشک و نیمه‌خشک ایران، که وابستگی بالایی به منابع آب زیرزمینی دارند، از اهمیت بیشتری برخوردار است. ازاین‌رو در هرگونه مطالعه مرتبط با فرونشست، بررسی دقیق رفتار و تغییرات سطح آب زیرزمینی، جزء مراحل اساسی و غیرقابل‌چشم‌پوشی محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر، با هدف تحلیل دقیق فرونشست دشت مرند، روند تغییرات سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی طی سال‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، از اطلاعات چاه‌های پیزومتری مستقر در سطح دشت استفاده شد که از معتبرترین منابع داده‌ای برای ارزیابی پویایی آبخوان‌ها به شمار می‌روند. در نخستین گام، وضعیت فعلی آبخوان و سطح ایستابی در سال ۱۴۰۲ تحلیل شد. شکل ۷ نقشه هم‌سطح ایستابی دشت مرند را نشان می‌دهد که بر اساس درون‌یابی مکانی داده‌های پیزومتری تهیه شده است. این نقشه امکان مشاهده الگوی فضایی تغییرات سطح آب زیرزمینی و مشخص‌کردن نواحی دارای افت شدید یا کم‌عمق را فراهم می‌کند.

نتایج به دست آمده از نظر آماری نشان می‌دهد:

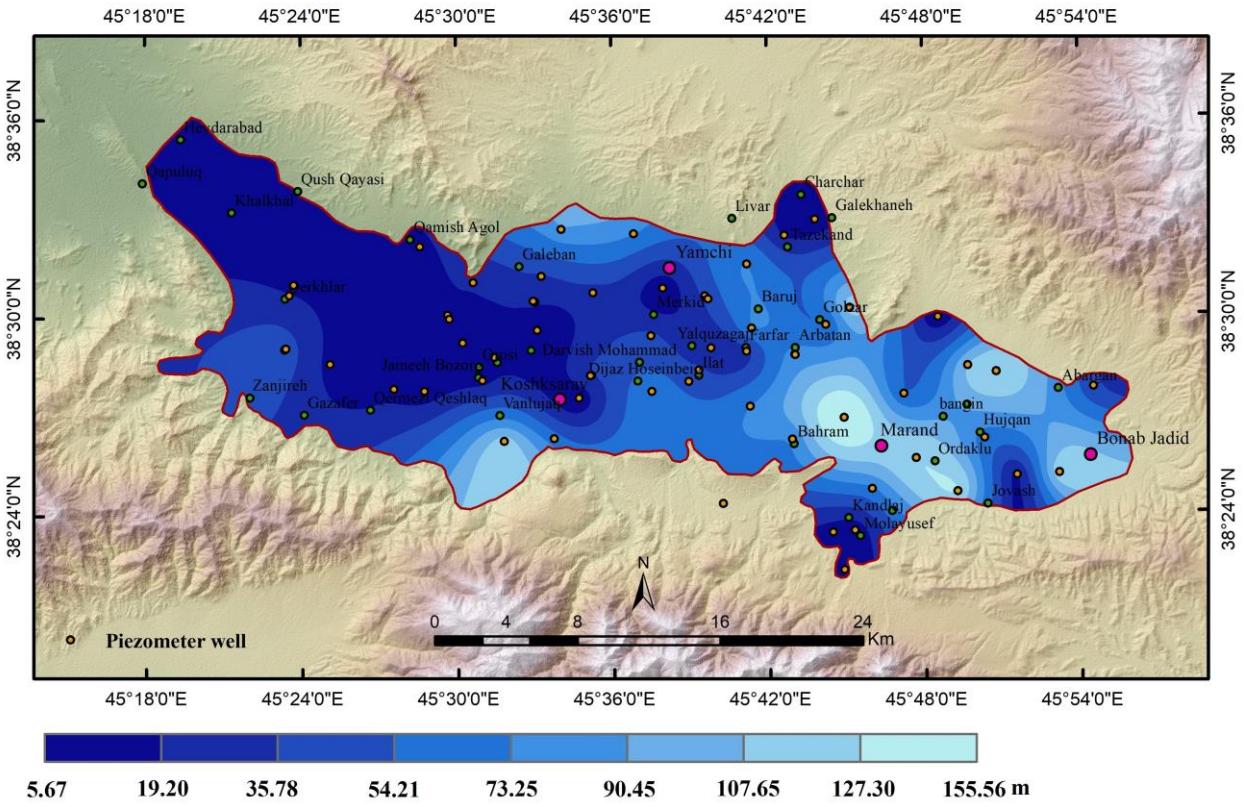
- میانگین سطح ایستابی دشت مرند برابر با ۴۸/۶ متر است که نشان‌دهندهٔ عمق نسبتاً زیاد آب زیرزمینی در بخش‌های مختلف دشت می‌باشد.
- کمترین عمق سطح ایستابی، حدود ۵ متر، در غرب دشت و در محدوده نزدیک به تلاقی رودخانه‌های زیلبرچای و قطورچای مشاهده می‌شود. نزدیکی به سطح اساس محلی، وجود بسترهای آبرفتی و برداشت کمتر در این ناحیه، علت اصلی کم عمق بودن سطح ایستابی است.
- بیشترین عمق سطح ایستابی، حدود ۱۵۶ متر، در شرق دشت و اطراف شهر مرند قرار دارد. این ناحیه دارای برداشت‌های بیشتر، تراکم جمعیتی بالا و تغذیه کمتر آبخوان است.
- انحراف معیار ۳۵/۳ متر نشان‌دهندهٔ وجود تفاوت چشمگیر و تغییرپذیری بالا در عمق سطح آب زیرزمینی در سراسر دشت مرند است؛ موضوعی که اهمیت بررسی‌های محلی و نقطه‌ای را دوچندان می‌کند.

از نظر الگوی کلی، سطح ایستابی از شرق به غرب و همچنین از ارتفاعات شمالی (قره‌داغ) و جنوبی (میشوداغ) به سوی مرکز دشت به طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. این وضعیت بیانگر جهت عمومی جریان زیرزمینی و نیز توزیع مکانی مناطق تغذیه و تخلیه آبخوان است. در پهنه‌های مرتفع پیرامونی دشت، به دلیل نفوذپذیری بیشتر و تغذیهٔ طبیعی بهتر، سطح آب بالاتر قرار دارد، درحالی‌که در بخش‌های مرکزی و کم‌ارتفاع، افزایش بهره‌برداری انسانی و کاهش تغذیه، موجب افت محسوس سطح ایستابی شده است.

در نیمهٔ غربی دشت مرند، سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در عمق‌های کم‌تری قرار دارد و این امر بیانگر فاصلهٔ کم میان سطح آبخوان و سطح زمین است. وجود چنین شرایطی معمولاً سبب می‌شود که آبخوان در برابر نوسانات هیدرولوژیکی- مانند بارندگی‌های فصلی، تغییرات دما و شدت برداشت‌ها- واکنش سریع‌تری نشان دهد. نزدیک بودن سطح آب به سطح زمین علاوه بر افزایش دامنهٔ نوسان سطح ایستابی، موجب افزایش آسیب‌پذیری آبخوان نسبت به نفوذ آلاینده‌ها نیز می‌شود؛ زیرا ضخامت لایه‌های محافظ در بالای آبخوان کاهش یافته و مسیر انتقال آلاینده‌ها به آب زیرزمینی کوتاه‌تر می‌شود. همچنین در چنین شرایطی، به‌ویژه در رسوبات دانه‌ریز و فشرده، امکان تراکم‌پذیری بیشتر لایه‌ها در اثر افت سطح آب فراهم شده و پتانسیل وقوع فرونشست زمین افزایش می‌یابد.

در بخش قابل‌توجهی از نیمهٔ غربی دشت مرند، عمق سطح ایستابی کمتر از ۲۰ متر است. این عمق کم، اگرچه در نگاه اول نشانه‌ای از دسترسی آسان‌تر به منابع آب زیرزمینی به‌نظر می‌رسد، اما در عمل می‌تواند تبعات جدی برای پایداری زمین و کیفیت آب به همراه داشته باشد. از نظر کیفیت، وجود واحدهای زمین‌شناسی شور، نهشته‌های نمک‌دار و کفه‌های نمکی در بخش‌هایی از نوار غربی دشت، تأثیر مستقیمی بر ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی دارد. این تشکیلات باعث افزایش شوری و هدایت الکتریکی آب

می‌شوند و به‌تدریج کیفیت منابع آب را در این بخش از دشت کاهش می‌دهند. چنین روندی غالباً در مناطق پایین‌دست دشت‌ها که محل تجمع مواد محلول و املاح هستند، شدیدتر دیده می‌شود.



شکل ۷- سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در دشت مرند

Fig. 7. Groundwater table of Marand Plain

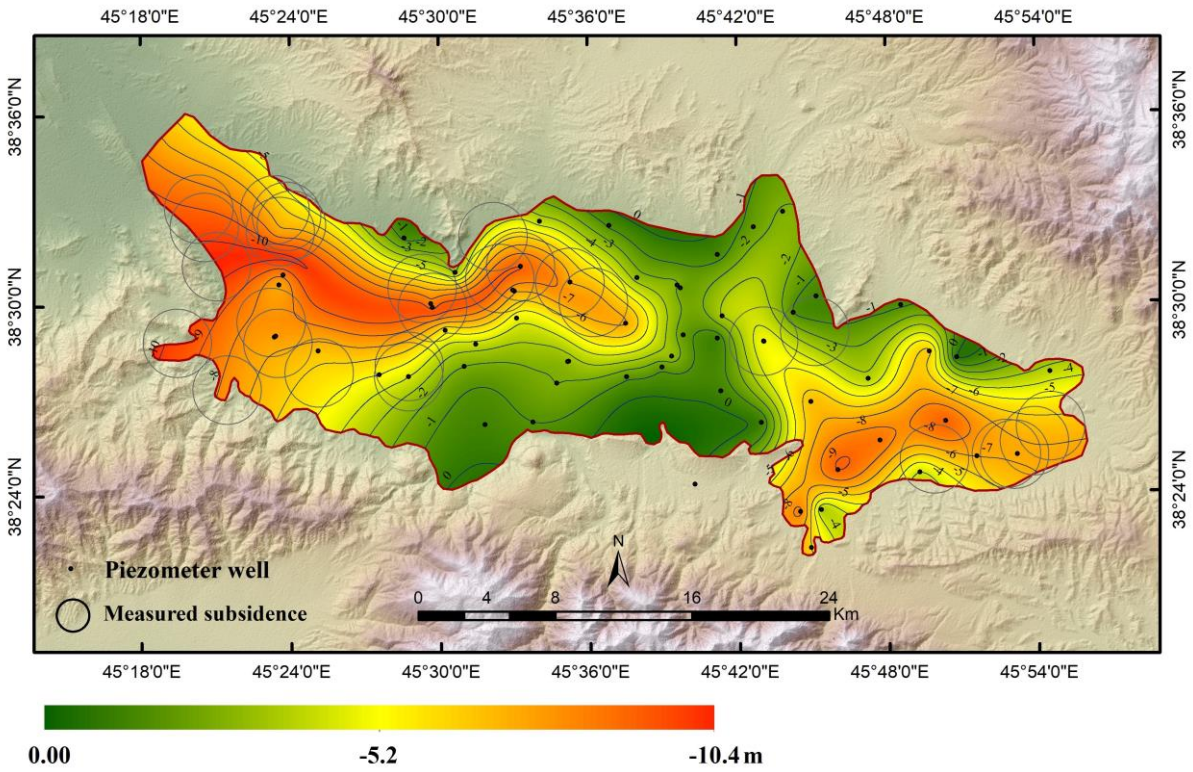
در مقابل، در نیمه شرقی دشت مرند- به‌ویژه در محدودهٔ شهر مرند و اطراف آن- شرایط کاملاً متفاوت است. در این ناحیه، سطح ایستابی در عمق‌های بسیار بیشتری از سطح زمین قرار دارد. در بسیاری از نقاط این قسمت، عمق سطح آب زیرزمینی بیش از ۹۰ متر است و در بخشی از پهنه شرقی دشت، سطح ایستابی حتی در عمق بیش از ۱۵۰ متر مشاهده شده است. این اختلاف قابل توجه در عمق، بازتابی از چند عامل مهم است: افزایش تراکم جمعیتی و برداشت بیشتر آب زیرزمینی در بخش‌های شهری و کشاورزی پرمصرف، ساختار زمین‌شناسی متفاوت، و همچنین دوری از نواحی تغذیه طبیعی آبخوان. در نیمه شرقی دشت، پهنه‌های دارای سطح ایستابی کم‌عمق‌تر غالباً در حاشیه دشت و در محدودهٔ مخروط‌افکنه‌های پای‌کوهی قرار دارند؛ مناطقی که به‌دلیل رسوبات آبرفتی درشت‌دانه و نفوذپذیری بالا، تغذیه آبخوان به‌صورت مؤثر انجام می‌شود. نمونهٔ بارز این وضعیت، رأس مخروط‌افکنه زنوزچای است که در مناطق پیرامون روستاهای چرچر و تازه‌کند آخوند مشاهده می‌شود. در این بخش، ورود آب‌های سطحی و نفوذ سریع آن‌ها در رسوبات مخروط‌افکنه‌ای، سطح آب زیرزمینی را در عمق کمتری قرار داده و یک ناحیهٔ تغذیه‌ای نسبتاً فعال برای آبخوان ایجاد کرده است.

به طور کلی، مقایسه شرایط نیمهٔ شرقی و غربی دشت مرند نشان دهندهٔ ناهمگونی فضایی قابل توجه در عمق سطح ایستابی است؛ موضوعی که در تحلیل روند فرونشست زمین اهمیت ویژه‌ای دارد. چنین ناهمگونی نه تنها رفتار آبخوان را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه نوع و شدت واکنش لایه‌های زمین به افت سطح آب را نیز تعیین می‌کند. در بخش‌های کم‌عمق غربی، آسیب‌پذیری بیشتر و احتمال نشست سریع‌تر است، در حالی که در بخش‌های عمیق شرقی، فرونشست وا بسته به افت طولانی مدت سطح آب خواهد بود.

ارزیابی تغییرات سطح آب زیرزمینی

بررسی تغییرات زمانی سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی یکی از اساسی‌ترین مراحل در تحلیل فرونشست زمین در دشت مرند به‌شمار می‌رود، زیرا افت تدریجی سطح آب زیرزمینی مستقیماً بر تراکم‌پذیری لایه‌های زمین و در نتیجه میزان نشست آن تأثیر می‌گذارد. در این تحقیق، تغییرات سطح ایستابی آبخوان مرند در دوره زمانی ده‌ساله اخیر مورد تحلیل قرار گرفت تا روند کلی افت، شدت و پراکندگی مکانی آن مشخص شود. نتایج این تغییرات در شکل ۸ ارائه شده است.

بر اساس محاسبات پیکسل‌پایه، میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت مرند برابر با ۴/۶۷- متر بوده است. این مقدار بیانگر آن است که طی یک دههٔ گذشته، سطح ایستابی در اغلب مناطق دشت به‌طور پیوسته کاهش یافته است. حداقل مقدار افت، حدود ۰ متر و بیشترین مقدار افت نیز حدود ۱۰/۴- متر محاسبه شده است که نشان دهندهٔ اختلاف مکانی قابل توجه در رفتار آبخوان می‌باشد. بررسی الگوی فضایی افت نشان می‌دهد که کمترین میزان افت سطح آب زیرزمینی در بخش‌هایی از نوار شمالی و جنوبی دشت رخ داده است. این دو ناحیه عمدتاً منطبق بر رأس مخروط‌افکنه‌های پای‌کوهی هستند؛ مناطقی که به طور طبیعی نرخ تغذیهٔ آبخوان در آن‌ها بیشتر و برداشت آب نسبتاً کمتر است.



شکل ۸- تغییرات سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی دشت مرند

Fig. 8. Changes in groundwater table level in the Marand Plain

در نوار شمالی، محدوده‌هایی که کمترین افت را نشان می‌دهند شامل مخروط‌افکنه زنوزچای در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه قره‌داغ است. در نوار جنوبی نیز، کمترین افت در مخروط‌افکنه‌های حد فاصل کشکسرای تا روستای بهرام و در پایکوه‌های رشته‌کوه‌های میشوداغ ثبت شده است. در این پهنه‌ها، افت سطح آب زیرزمینی عمدتاً بین ۰ تا ۳- متر بوده است. علت پایین‌تر بودن میزان افت در این مناطق را می‌توان به چند عامل نسبت داد: (۱) تراکم نسبتاً کم جمعیت و در نتیجه برداشت کمتر آب برای مصارف شرب و کشاورزی؛ (۲) تغذیه مؤثر آبخوان توسط آبراهه‌ها و رودخانه‌هایی که از ارتفاعات قره‌داغ و میشوداغ سرچشمه می‌گیرند و آب را به‌سمت مخروط‌افکنه‌ها هدایت می‌کنند؛ (۳) نفوذپذیری بالاتر رسوبات مخروط‌افکنه‌ای که موجب افزایش نرخ نفوذ و کاهش رواناب سطحی می‌شود؛ (۴) کاهش فشار بهره‌برداری کشاورزی در مقایسه با بخش‌های مرکزی یا شرقی دشت که تحت شدت بیشتری از برداشت قرار دارند. در مقابل، بخش‌هایی از دشت که از تغذیه طبیعی کمتری برخوردارند یا در آنها برداشت آب سهم بالایی دارد، شاهد بیشترین میزان افت طی ده سال اخیر بوده‌اند. این روند افت مداوم، در کنار شرایط زمین‌شناسی خاص بخش‌های مرکزی دشت، زمینه‌ساز افزایش پتانسیل فرونشست شده و اهمیت مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی را بیش از پیش برجسته می‌کند.

بیشترین میزان افت سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در دشت مرند مربوط به جنوب‌شرق دشت و همچنین بخش‌هایی از نیمه غربی دشت است. بررسی‌های انجام‌شده بر اساس داده‌های پیزومتری و مدل‌سازی‌های مکانی نشان می‌دهد که در بخش‌های قابل‌توجهی از این پهنه‌ها، افت سطح ایستابی بیش از ۶ متر بوده و در برخی نقاط حتی مقادیر بزرگ‌تری نیز ثبت شده است. این میزان افت، بیانگر فشار چشمگیر بر آبخوان در طی یک دهه گذشته و نشانه‌ای از ناپایداری هیدروژئولوژیکی منطقه است. در جنوب‌شرق دشت مرند، تمرکز بالایی از سکونتگاه‌ها و فعالیت‌های انسانی وجود دارد. شهر مرند به‌عنوان مرکز شهرستان، یکی از بزرگ‌ترین نقاط جمعیتی منطقه محسوب می‌شود و شهر بناب جدید نیز در همین بخش از دشت قرار دارد. افزون بر این دو شهر، چندین روستای پرجمعیت نیز در این پهنه استقرار یافته‌اند که مجموعاً بار قابل توجهی بر منابع آب زیرزمینی وارد می‌کنند. طبیعی است که این تراکم بالای جمعیت، همراه با توسعه کاربری‌های شهری و کشاورزی، منجر به برداشت بیش از حد از چاه‌های آب زیرزمینی و کاهش حجم ذخیره آبخوان شود. از سوی دیگر، دشت مرند طی سال‌های اخیر تحت تأثیر خشکسالی‌های پی‌درپی و ممتد قرار داشته است. کاهش چشمگیر بارندگی‌های سالانه، کاهش جریان‌های سطحی و محدود شدن تغذیه طبیعی آبخوان، سبب شده است که بیلان آب زیرزمینی در اکثر سال‌ها منفی باشد. در چنین شرایطی، حتی برداشت‌های معمول نیز می‌توانند موجب افت معنی‌دار سطح ایستابی شوند، چه رسد به برداشت‌های فراتر از ظرفیت تجدیدپذیر آبخوان. ترکیب این عوامل - یعنی برداشت بی‌رویه ناشی از جمعیت و فعالیت‌های انسانی از یک‌سو و کاهش شدید تغذیه آبخوان به علت خشکسالی‌های متوالی از سوی دیگر- باعث شده است که در جنوب شرقی دشت مرند، افت سطح ایستابی به طور چشمگیر و نگران‌کننده‌ای بالاتر از سایر نقاط دشت باشد. این الگوی افت شدید، نه تنها نشان‌دهندهٔ فشار بیش از حد بر آبخوان است، بلکه بیانگر افزایش خطر فرونشست زمین نیز می‌باشد، زیرا افت مداوم سطح آب، نقش قابل توجهی در فشردگی و تراکم‌پذیری لایه‌های ریزدانه زمین دارد. به طور کلی، روند ثبت شده در این بخش از دشت مرند هشداری است نسبت به ضرورت مدیریت یکپارچه منابع آب، کنترل برداشت‌های غیرمجاز، تغییر الگوی کشت، و برنامه‌ریزی دقیق برای مقابله با اثرات بلندمدت خشکسالی بر آبخوان منطقه.

افت سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در نیمهٔ غربی دشت مرند نیز بسیار قابل توجه بوده است. هرچند تراکم جمعیتی و شدت توسعهٔ شهری در این بخش از دشت نسبت به نیمهٔ شرقی کمتر است، اما مجموعه‌ای از عوامل طبیعی و انسانی موجب شده‌اند که نرخ افت سطح آب زیرزمینی در این ناحیه به طور معناداری افزایش یابد. یکی از عوامل اصلی، کاهش محسوس تغذیهٔ آبخوان در نیمهٔ غربی دشت است. در این بخش، رودخانه زیلبرچای- که یکی از مهم‌ترین منابع تغذیه آبخوان محسوب می‌شود- طی سال‌های اخیر با کاهش چشمگیر دبی مواجه شده است. این کاهش دبی (مخصوصاً از سال ۱۳۸۳ بدین‌سو) نتیجهٔ چند عامل عمده است: (۱) خشکسالی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی که طی دو دههٔ اخیر شدت یافته‌اند و میزان بارندگی و رواناب سطحی را کاهش داده‌اند؛ (۲) برداشت گستردهٔ آب در بالادست برای مصارف کشاورزی و شهری که حجم آب ورودی به پایین دست را تا حد زیادی کاهش می‌دهد؛

(۳) تغییر الگوی بارش‌ها و افزایش تبخیر در اثر گرمایش منطقه‌ای که باعث می‌شود بخشی از بارش‌های اندک نیز وارد آبراهه‌ها نشوند. از سوی دیگر، نیمه غربی دشت مرند طی دهه‌های اخیر شاهد گسترش سطح زیرکشت و توسعهٔ فعالیت‌های کشاورزی آبی بوده است. این افزایش سطح زیرکشت موجب شده تا چاه‌های عمیق متعدد - به‌ویژه بر روی مخروط‌افکنه‌های پایکوه‌های رشته‌کوه‌های میشوداغ - حفر شوند. برداشت بی‌رویه از این چاه‌ها، فراتر از ظرفیت تجدیدپذیر آبخوان، روند افت سطح ایستابی را سرعت بخشیده است. بر اساس داده‌های موجود، در برخی مناطق نیمه غربی دشت، افت سطح آب زیرزمینی حتی از ۱۰ متر نیز فراتر رفته است که نشان دهندهٔ فشار شدید بر منابع آب زیرزمینی است.

عامل مهم دیگری که شدت و پیامدهای افت سطح ایستابی را در این پهنه افزایش می‌دهد، ویژگی‌های زمین‌شناسی آبخوان غرب دشت مرند (مخصوصاً دو عامل ضخامت و محیط آبخوان) است. در این رابطه، هر چه ستون رسوبی یک آبخوان از نظر ضخامت گسترده‌تر باشد، قابلیت آن برای تجربهٔ فشردگی بیشتر تحت یک کاهش فشار معین افزایش می‌یابد. این اصل، یکی از مبانی مهم در تحلیل رفتار آبخوان‌ها و بررسی پدیده‌هایی همچون فرونشست زمین است. بیشترین ضخامت رسوبات مربوط به بخش مرکزی دشت، در شمال روستاهای یالقوزآغاج و فارفار است؛ جایی که ضخامت تقریبی رسوبات به حدود ۲۸۲ متر می‌رسد. این پهنه با مساحتی در حدود ۳/۲ کیلومتر مربع از نظر هیدروژئولوژیکی یکی از مهم‌ترین بخش‌های دشت به شمار می‌رود. پس از آن، کلاس ضخامت ۲۲۵ تا ۲۸۰ متر قرار می‌گیرد که در دو ناحیه مجزا از دشت مرند گسترش یافته است: یکی در بخش‌های مرکزی و دیگری در جنوب‌شرقی. در محدودهٔ مرکزی، روستاهای مرکید، باروج، فارفار، یالقوزآغاج و ارباتان بر روی این پهنه‌ها واقع شده‌اند. در بخش جنوب‌شرقی نیز روستاهای دیزج علیا و جواش به همراه شهر بناب جدید در این ناحیه مستقر شده‌اند. بررسی داده‌های تداخل‌سنجی راداری نشان می‌دهد که تعدادی از فرونشست‌های اندازه‌گیری شده دستگاهی، به‌ویژه در نوار جنوب‌شرقی دشت، دقیقاً بر روی پهنه‌هایی با ضخامت ۲۲۵ تا ۲۸۰ متر رخ داده‌اند. این هم‌پوشانی مکانی بیانگر آن است که ضخامت قابل توجه رسوبات در این مناطق شرایط مساعدی برای بروز فرونشست فراهم کرده است. این کلاس ضخامت با مساحتی حدود ۷۹/۲ کیلومتر مربع حدود ۱۲/۳ درصد از مساحت کل دشت را به خود اختصاص می‌دهد. در مرتبهٔ بعد، کلاس ضخامت ۱۷۵ تا ۲۲۵ متر قرار دارد که گسترهٔ وسیعی معادل ۲۱۴ کیلومتر مربع یعنی حدود ۳۳/۴ درصد از کل دشت را شامل می‌شود (شکل ۹). بخش عمده‌ای از فرونشست‌های اندازه‌گیری شده دستگاهی نیز در محدوده همین پهنه رخ داده‌اند، به ویژه در نیمهٔ غربی دشت که ضخامت رسوبات در قسمت‌های وسیعی از آن در همین بازه قرار دارد. این الگو در نوار جنوب‌شرقی دشت نیز قابل مشاهده است.

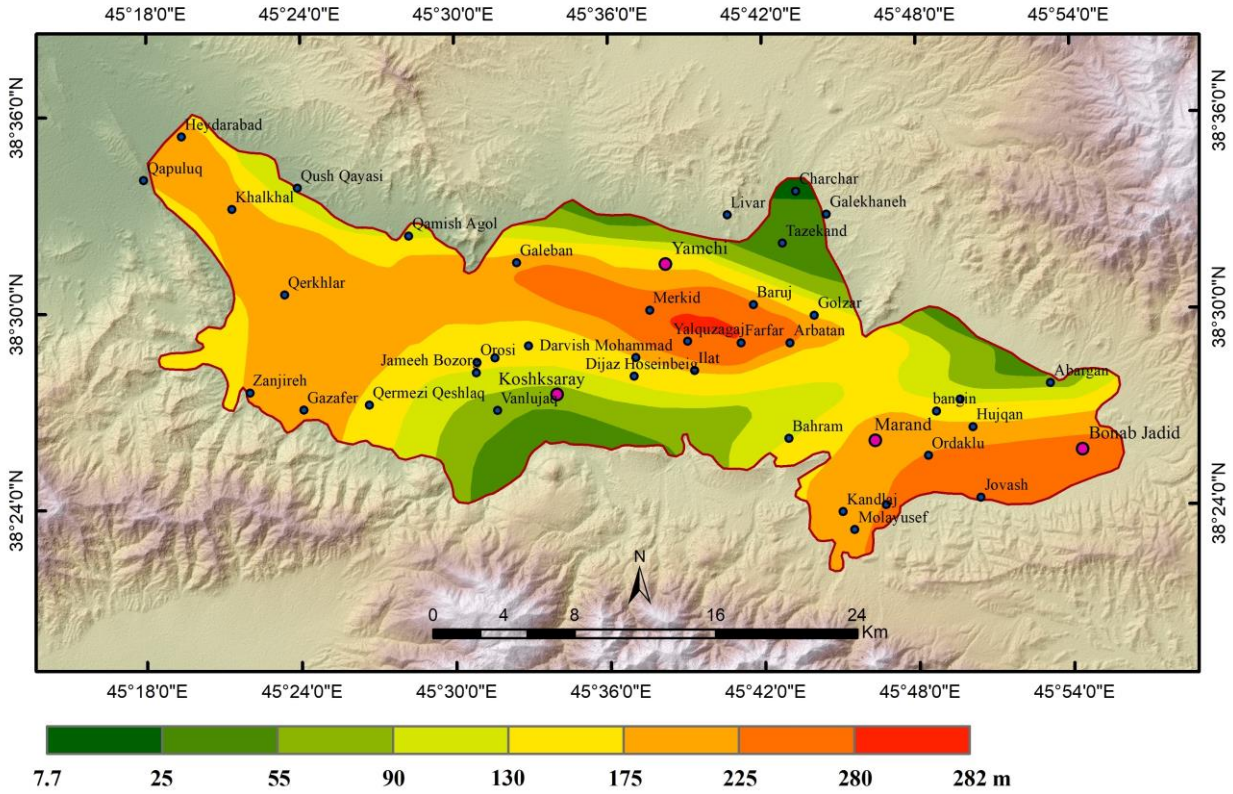
مطابق با طبقه‌بندی ندیری و همکاران (Nadiri, Taheri, Khatibi, Barzegari & Dideban, 2018)، برای تبدیل داده‌های کیفی خاک به شاخص‌های کمی: رسوبات آبرفتی درشت‌دانه (گراول و ماسه درشت) رتبه ۳، ماسه با دانه‌بندی متوسط تا ریز رتبه ۵، ترکیبات ماسه همراه با سیلت یا رس زیاد رتبه ۷ و ترکیبات غالباً سیلتی- رسی رتبه ۹ دریافت می‌کنند. در شکل ۱۰ لایه کمّی محیط آبخوان ارائه شده است. بخش قابل توجهی از آبخوان مرند دارای بافت ریزدانه (عمدتاً رس) است. رفتار رس در برابر افت سطح ایستابی و خروج آب از خلل و فرج به‌گونه‌ای است که:

- با کاهش سطح ایستابی، آب درون حفره‌های خاک تخلیه شده و فشار مؤثر بر اسکلت جامد خاک افزایش می‌یابد.
- این افزایش فشار باعث تراکم و فشردگی تدریجی ذرات می‌شود.
- در رس‌ها، به دلیل نفوذپذیری بسیار پایین، این فرآیند با تأخیر زمانی رخ می‌دهد اما تراکم ایجاد شده دائمی و غیر قابل بازگشت است (تراکم پلاستیک).
- این پدیده که در مهندسی ژئوتکنیک، تحکیم[1] نامیده می‌شود، یکی از اصلی‌ترین مکانیسم‌های فرونشست در دشت‌های رس‌دار است.

1 - Consolidation

- در مقابل، در لایه‌های ماسه‌ای، افت سطح آب باعث تراکم سریع‌تر ولی با بزرگی کمتر و تا حدی قابل برگشت می‌شود.

بنابراین ترکیب چهار عامل: افت شدید سطح آب زیرزمینی، کاهش تغذیه آبخوان، ضخامت زیاد آبخوان و وجود رسوبات ریزدانه تراکم‌پذیر موجب شده است که نیمهٔ غربی دشت مرند به طور ویژه نسبت به فرونشست زمین حساس و آسیب‌پذیر باشد. این موضوع در نتایج حاصل از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR) نیز به‌وضوح مشاهده شده است. داده‌های InSAR نشان می‌دهد که طی چند سال اخیر، بیشترین نرخ فرونشست زمین در بخش‌های غربی دشت مرند رخ داده است و آهنگ نشست در این نواحی به‌مراتب بالاتر از سایر بخش‌های دشت است. این هم‌خوانی میان داده‌های هیدروژئولوژیکی و مشاهدات ژئودتیکی، نقش تعیین‌کننده افت سطح آب زیرزمینی را در وقوع فرونشست در نیمه غربی دشت مرند به صورت علمی تأیید می‌کند.

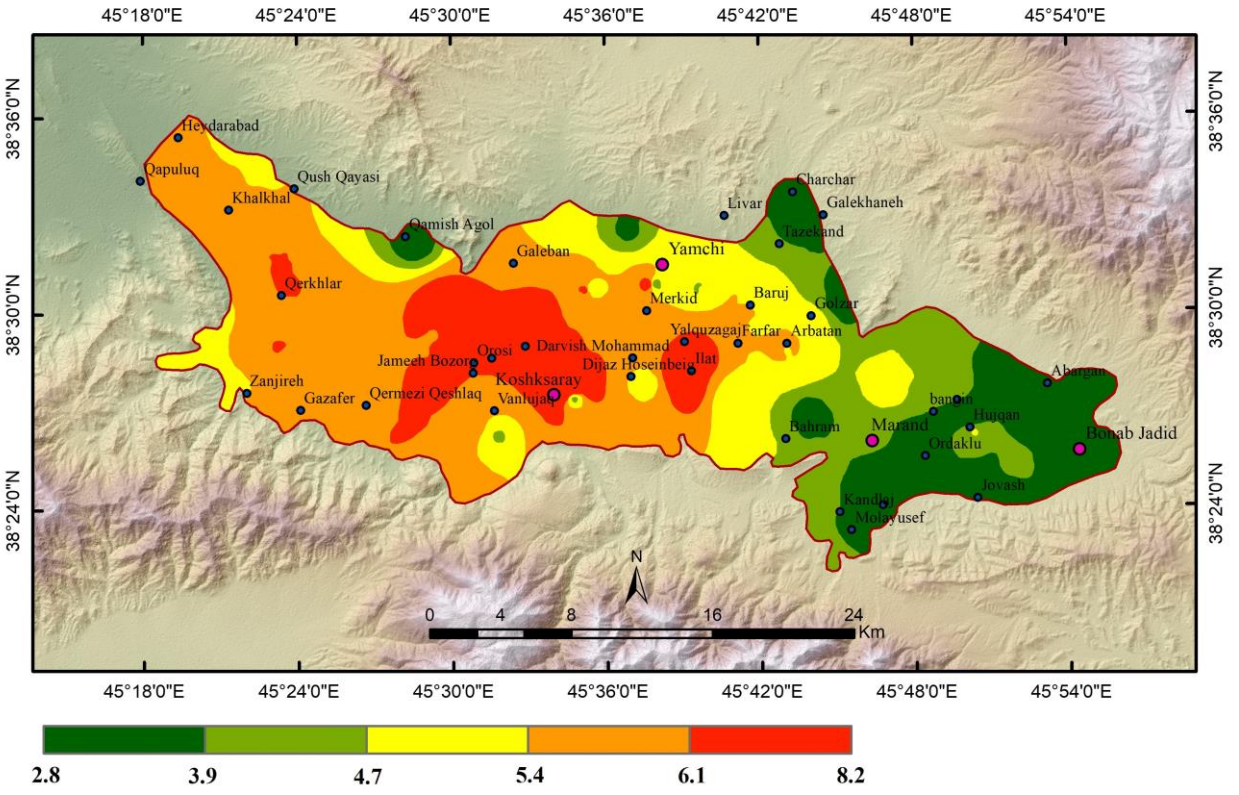


شکل ۹- توزیع فضایی ضخامت آبخوان در محدودهٔ دشت مرند

Fig. 9. Spatial distribution of aquifer thickness in the Marand Plain

نتایج تحقیق نشان می‌دهد که افت سطح آب زیرزمینی به عنوان اصلی‌ترین عامل محرک فرونشست در دشت مرند به شمار می‌رود. داده‌های پیزومتری در بازهٔ ده سالهٔ اخیر نشان داد که میانگین افت سطح ایستابی در دشت مرند به میزان ۴/۶۷- متر بوده است. این افت در برخی مناطق، به ویژه در جنوب‌شرق دشت (اطراف شهر مرند و بناب جدید) و نیمهٔ غربی دشت، حتی از ۱۰ متر نیز فراتر رفته است. این کاهش قابل توجه فشار منفذی در لایه‌های آبخوان را کاهش داده و تنش مؤثر بر ذرات خاک را افزایش می‌دهد که در نهایت منجر به تراکم و فشردگی لایه‌های رسوبی و نشست سطح زمین می‌شود. علاوه بر این، تطابق کاملی بین پهنه‌های دارای بیشترین افت سطح آب زیرزمینی و مناطق با نرخ فرونشست بالا مشاهده شده است. به طور مشخص، نیمهٔ غربی دشت مرند که با بیشترین نرخ فرونشست (گاه بیش از ۳/۷ سانتیمتر) مواجه است، همزمان شاهد کاهش شدید تغذیه آبخوان (به ویژه از طریق رودخانه زیلبرچای) و افت مداوم سطح ایستابی بوده است. اگرچه عوامل دیگری مانند ضخامت زیاد آبخوان (تا ۲۸۲

متر در بخش مرکزی)، غلبه رسوبات ریزدانه رسی و سیلتی (به ویژه در نیمهٔ غربی)، تغذیه کم آبخوان، شیب کم زمین و فعالیت‌های انسانی (مانند تغییر کاربری اراضی) نیز در تشدید فرونشست نقش داشته‌اند، اما این عوامل عمدتاً به عنوان شرایط زمینه‌ساز، تشدیدکننده یا تقویت‌کننده عمل کرده‌اند. به عنوان مثال، ضخامت و جنس رسوبات، میزان آسیب‌پذیری منطقه را در برابر همان عامل اصلی (افت سطح آب) تعیین می‌کند. در نیمهٔ شرقی دشت که برداشت آب بیشتر است ولی رسوبات درشت‌دانه‌تر هستند، نرخ فرونشست به نسبت کمتر از نیمه غربی است که با وجود برداشت کمتر، رسوبات رسی و سیلتی مستعدتر و تغذیه بسیار محدودتری دارد.



شکل ۱۰- لایه کمّی محیط آبخوان در محدودهٔ دشت مرند

Fig. 10. Quantitative layer of the aquifer system within the Marand Plain

پژوهش حاضر نشان می‌دهد که بیشترین مناطق مستعد و درگیر پدیدهٔ فرونشست در دشت مرند، در بخش‌های غربی و مرکزی این دشت متمرکز شده‌اند. این یافته نه تنها از طریق نقشه‌های مستقیم نرخ نشست، بلکه از طریق بررسی علمی عوامل علّی نیز به طور کامل تأیید می‌گردد:

شواهد مستقیم از پایش ماهواره‌ای و میدانی: پردازش تصاویر راداری در بازهٔ چهار ساله (۲۰۲۴-۲۰۲۰) نقشه‌ای از نرخ فرونشست ارائه می‌دهد که در آن کانون‌های بحرانی با نرخ‌هایی تا ۳/۷۴۵ سانتی‌متر در سال، به شکل یک نوار ممتد در نیمهٔ غربی و بخش‌های وسیعی از مرکز دشت آشکار می‌شوند. این الگو به طور همزمان توسط اندازه‌گیری‌های زمینی با دستگاه GPS سه فرکانسه در نقاط متعددی مانند اطراف رودخانه زیلبرچای، مناطق کشکسرای و بخش‌هایی از مرکز دشت اعتبارسنجی شده است. تطابق فضایی بالا بین این دو منبع داده، وجود یک واقعیت فیزیکی متمرکز در غرب و مرکز دشت را غیر قابل انکار می‌سازد.

تحلیل کمی پهنه‌های فرونشست: بررسی مساحت کلاس‌های مختلف فرونشست گویای این تمرکز است. تنها حدود ۹/۵ درصد از دشت در کلاس فرونشست بسیار کم قرار دارد که عمدتاً محدود به حاشیه‌های شمالی و کوهپایه‌هاست. در مقابل، کلاس‌های نگران‌کننده متوسط، زیاد و بسیار زیاد مجموعاً نزدیک به ۷۰ درصد از مساحت دشت را پوشش می‌دهند. نکتهٔ کلیدی؛ توزیع مکانی این کلاس‌هاست؛ کلاس فرونشست بسیار زیاد (۱۳ درصد مساحت) عمدتاً در نیمهٔ غربی و گوشه جنوب‌شرقی، کلاس فرونشست زیاد (۲۴ درصد) به وضوح در نیمه غربی و کلاس متوسط (۳۳ درصد) در بخش‌های مرکزی و میانی دشت پراکنده شده‌اند. حتی شهر مهم مرند نیز در دل پهنه متوسط قرار گرفته که نشان از گستردگی اثر این پدیده تا سکونتگاه‌های اصلی دارد.

ترکیب مخرب عوامل در غرب و مرکز دشت: این تمرکز مکانی تصادفی نیست، بلکه حاصل برهم‌کنش چندین عامل تشدیدکننده است که در غرب و مرکز دشت به اوج خود می‌رسد. عامل محرک اصلی، افت شدید سطح آب زیرزمینی است. در نیمه غربی، این افت نه تنها ناشی از برداشت برای کشاورزی است، بلکه به‌طور ویژه تحت تأثیر کاهش شدید تغذیه طبیعی آبخوان قرار دارد. رودخانه زیلبرچای به عنوان شریان اصلی تغذیه این ناحیه، از سال ۲۰۰۴ وارد یک دوره خشکسالی هیدرولوژیکی طولانی‌مدت شده و دبی آن به طور پیوسته کاهش یافته است. این موضوع در کنار برداشت‌های بالادست، ورودی آب به آبخوان غرب دشت را به حداقل رسانده است. از سوی دیگر، ویژگی‌های ذاتی زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی این مناطق، آن‌ها را مستعدترین نقاط برای تبدیل افت آب به فرونشست کرده است. ضخامت آبخوان در بخش‌های مرکزی به بیش از ۲۸۰ متر می‌رسد که حجم عظیمی از مواد مستعد تراکم را فراهم می‌کند. همزمان، جنس رسوبات در راستای شرق به غرب دشت ریزدانه‌تر می‌شود، به طوری که در نیمه غربی رسوبات رسی و سیلتی غالب می‌گردند. این رسوبات به دلیل تخلخل بالا و قابلیت تراکم‌پذیری زیاد، در برابر کاهش فشار منفذی ناشی از افت آب، به شدت فشرده شده و نشست قابل توجهی ایجاد می‌کنند. بنابراین، غرب دشت به دلیل تغذیهٔ کم، برداشت نسبی آب، ضخامت زیاد و جنس بسیار حساس رسوبات از پتانسیل بسیار بالایی برای پدیدهٔ فرونشست برخوردار است.

عوامل تشدیدکننده محیطی و انسانی: توپوگرافی مسطح و کم ارتفاع مناطق مرکزی و غربی (عمدتاً کمتر از ۱۱۵۰ متر) نیز به این فرآیند کمک می‌کند. از طرف دیگر، الگوی کاربری اراضی به ویژه گسترش کشاورزی آبی (که ۵۴ درصد دشت را پوشش می‌دهد) و تغییر مراتع به دیم، بار اضافه‌ای بر منابع آب زیرزمینی وارد کرده و تعادل هیدرولوژیک را بیشتر برهم زده است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تحلیل مکانیسم‌ها و شناسایی عوامل مؤثر بر پدیدهٔ فرونشست زمین در دشت مرند، با استفاده از رویکردی تلفیقی شامل فناوری نوین تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، داده‌های هیدروژئولوژیکی، زمین‌شناسی و مشاهدات میدانی انجام شد. روش‌شناسی به کار گرفته شده در این پژوهش با شاخص‌های مساحت زیر منحنی (AUC) برابر ۰/۹۴۹ و ضریب جینی ۰/۸۹۸ و تطابق قابل قبول با اندازه‌گیری‌های میدانی GPS، تأیید گردید. یافته‌های این تحقیق تصویری هشدار دهنده و جامع از ابعاد این مخاطره ژئومورفولوژیکی ارائه می‌دهد و گویای وضعیت بحرانی در بخش‌های وسیعی از این دشت است. نتایج پایش ماهواره‌ای در بازهٔ زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ نشان داد که پدیدهٔ فرونشست به صورتی گسترده و با شدت‌های متفاوت، کل دشت مرند را تحت تأثیر قرار داده است. نرخ فرونشست از صفر تا حداکثر ۳/۷۴۵ سانتیمتر در نوسان است و میانگین آن برای کل دشت حدود ۱/۷۲۳- سانتی‌متر بر چهار سال برآورد شده است. تحلیل پهنه‌بندی فرونشست حاکی از آن است که تنها حدود ۹/۵ درصد از مساحت دشت (عمدتاً در حاشیه‌های شمالی و کوهپایه‌ها) در کلاس فرونشست بسیار کم قرار دارد. در مقابل، کلاس‌های متوسط، زیاد و بسیار زیاد مجموعاً نزدیک به ۷۰ درصد از وسعت دشت را پوشش می‌دهند. پرخطرترین مناطق، به طور مشخص در نیمهٔ غربی و بخش‌هایی از جنوب شرق دشت متمرکز شده‌اند و حتی شهرهای مهمی مانند مرند، کشکسرای و بناب جدید در دل این پهنه‌های با نرخ نشست متوسط تا بالا قرار گرفته‌اند که نشان‌دهندهٔ تهدید مستقیم این پدیده برای سکونتگاه‌های انسانی و زیرساخت‌های حیاتی است.

عامل اصلی و مستقیم محرک فرونشست در منطقه، افت شدید و مداوم سطح آب‌های زیرزمینی شناسایی شد. داده‌های پیزومتری نشان می‌دهد میانگین افت سطح ایستابی در دهۀ اخیر به میزان ۴/۶۷- متر بوده و این مقدار در کانون‌های بحرانی جنوب شرق (اطراف مرند و بناب جدید) و نیمه غربی دشت، گاه از ۱۰ متر نیز فراتر رفته است. این کاهش، موجب کاهش فشار منفذی در لایه‌های آبخوان و افزایش تنش مؤثر بر ذرات خاک شده که در نهایت به تراکم و فشردگی لایه‌های رسوبی و نشست سطح زمین منجر می‌شود. هم‌پوشانی فضایی قابل توجه بین پهنه‌های دارای بیشترین افت آب زیرزمینی و مناطق با بالاترین نرخ فرونشست، این رابطه علّی را به وضوح تأیید می‌کند.

علاوه بر عامل محرک اصلی، ویژگی‌های ذاتی آبخوان نقش تعیین‌کننده‌ای در تشدید یا تعدیل فرونشست ایفا کرده‌اند. ضخامت زیاد آبخوان (تا ۲۸۲ متر در بخش مرکزی) حجم عظیمی از مواد مستعد تراکم را فراهم کرده است. از سوی دیگر، ریزدانه بودن رسوبات، به‌ویژه غلبۀ لایه‌های رسی و سیلتی در نیمۀ غربی دشت، باعث افزایش آسیب‌پذیری منطقه شده است. این رسوبات به دلیل قابلیت تراکم‌پذیری زیاد، در برابر افت سطح آب واکنش شدیدی نشان می‌دهند. کاهش تغذیه طبیعی آبخوان به ویژه از طریق رودخانه زیلبرچای به عنوان شریان اصلی، عامل تشدیدکننده بحران در نیمۀ غربی است. عوامل ژئومورفولوژیکی مانند ارتفاع کم و شیب ملایم در نواحی مرکزی و غربی، هم موجب تجمع رسوبات ریزدانه و ضخیم شده و هم امکان تغذیه مستقیم را کاهش داده است. همچنین، فعالیت‌های انسانی شامل گسترش کشاورزی آبی پرمصرف (پوشش ۵۴ درصدی دشت)، تغییر کاربری مراتع به دیم، و توسعه شهری، با افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی و کاهش نفوذپذیری خاک، چرخه معیوب تشدید فرونشست را تکمیل کرده‌اند.

در مجموع، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که دشت مرند، به‌ویژه نواحی غربی و جنوب شرقی آن، در وضعیت بحرانی نسبت به پدیده فرونشست قرار دارد. تداوم روندهای کنونی بهره‌برداری و عدم مداخله مدیریتی مؤثر، بحران را تشدید و خساراتی جبران‌ناپذیر به همراه خواهد داشت. لذا، اقدام فوری، همه‌جانبه و مبتنی بر شواهد علمی در قالب: (۱) مدیریت یکپارچه و پایدار منابع آب زیرزمینی با اولویت کنترل و نظارت بر برداشت‌ها، (۲) اجرای برنامه‌های تغذیه مصنوعی آبخوان در پهنه‌های مستعد، (۳) بازنگری اساسی در الگوهای کشاورزی و آبیاری به سمت روش‌های کم‌مصرف، (۴) اعمال ملاحظات مخاطره در طرح‌های توسعه‌ای و آمایش سرزمین، و (۵) پایش مستمر پهنه‌های فرونشست، به عنوان راهکارهای کلیدی و اجتناب‌ناپذیر برای مهار این بحران و حرکت به سمت تاب‌آوری محیطی در دشت مرند پیشنهاد می‌گردد.

References

Abbaszadeh, A., Safari, A., & Ahmadabadi, A. (2024). Estimating the Subsidence Rate of Eyvanakey Plain and Analyzing the Role of Human Activities in its Occurrence. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(3), 35-55. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2024.87559.1477

Amiri, F., Momeni, M., & Mirassi, S. (2023). Assessing subsidence risk of Lordegan county using radar interferometry technique. *Quantitative Geomorphological Research*, *12*(2), 230-244. [In Persian] https://doi.org/10.22034/gmpj.2023.405603.1443

Asadzadeh, F., Kaki, M., Shakiba, S., & Raei, B. (2016). Impact of Drought on Groundwater Quality and Groundwater Level in Qorveh-Chardoli Plain. *Iran-Water Resources Research*, *12*(3), 153-165. [In Persian] https://www.iwrr.ir/article_32629.html?

Azarm, Z., Mehrabi, H., & Nadi, S. (2023). Investigating the Relationship between Subsidence and Groundwater Level Changes using InSAR Time Series Analysis (Isfahan Study Area). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *11*(4), 173-192. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75774.1199

Batubara, B., Kooy, M., & Zwarteveen, M. (2023). Politicising land subsidence in Jakarta: How land subsidence is the outcome of uneven sociospatial and socionatural processes of capitalist urbanization. *Geoforum*, *139*, 103689. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2023.103689

Ding, P., Jia, C., Di, S., Wu, J., & Wei, R. (2021). Analysis and evaluation of land subsidence along linear engineering based on InSAR data. *Journal of Civil Engineering, 25*(9), 3477-3491. https://doi.org/10.1007/s12205-021-0201-z

El Kamali, M., Papoutsis, I., Loupasakis, C., Abuelgasim, A., Omari, K., & Kontoes, C. (2021). Monitoring of land surface subsidence using persistent scatterer interferometry techniques and ground truth data in arid and semi-arid regions, the case of Remah, UAE. *Science Total Environment, 776*, 145946. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145946

Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., & Rocca, F. (2007). *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. ESA Publications.

Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal, 19*(8), 1459. https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5

Guo, H., Yuan, Y., Wang, J., Cui, J., Zhang, D., Zhang, R., ... & Zhao, S. (2023). Large-scale land subsidence monitoring and prediction based on SBAS-InSAR technology with time-series sentinel-1A satellite data. *Remote Sensing, 15*(11), 2843. https://doi.org/10.3390/rs15112843

Haghshenas Haghighi, M., & Motagh, M. (2024). Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis of land subsidence in Iran. *Science Advances, 10*(19), eadk3039. https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adk3039

Hosseinzadeh, S. R., Akbari, E., Javanshiri, M., & Mohammadpour, Z. (2023). Spatial Analysis of Ground Subsidence using Radar Interferometry (Case Study: Central Plain of Ghaen City). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 11*(4), 99-126. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75138.1169

Hu, B., Zhou, J., Wang, J., Chen, Z., Wang, D., & Xu, S. (2009). Risk assessment of land subsidence at Tianjin coastal area in China. *Environmental Earth Sciences, 59*(2), 269. https://doi.org/10.1007/s12665-009-0024-6

Huang, L., Zhu, P., Zhang, T., He, L., Wu, W., Ge, Z., & Ai, H. (2025). Investigation of land subsidence in Guangdong Province, China, using PS-InSAR technique. *Advances in Space Research, 75*(4), 3507-3520. https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.12.034

Jiang, H., Zhang, J., Liu, Y., Li, J., & Fang, Z. N. (2023). Does flooding get worse with subsiding land? Investigating the impacts of land subsidence on flood inundation from Hurricane Harvey. *Science Total Environment, 865*, 161072. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161072

Karimzadeh, S., Matsuoka, M., & Ogushi, F. (2018). Spatiotemporal deformation patterns of the Lake Urmia Causeway as characterized by multisensor InSAR analysis. *Science Report, 8*, 5357. https://doi.org/10.1038/s41598-018-23650-6

Lin, Z., Huili, G., Lingling, J., Yaoming, S., Xiaojuan, L., & Jun, J. (2009). Research on evolution of land subsidence induced by nature and human activity by utilizing remote sensing technology. In 2009 Joint Urban Remote Sensing Event (pp. 1-5). IEEE. https://doi.org/10.1109/URS.2009.5137693

Melet, A., Buontempo, C., Mattiuzzi, M., Salamon, P., Bahurel, P., Breyiannis, G., ... & Voukouvalas, E. (2021). European Copernicus Services to inform on sea-level rise adaptation: current status and perspectives. *Frontiers in Marine Science, 8*, 703425. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.703425

Mohammady, M., Pourghasemi, H., & Amiri, M. (2021). Investigation of Subsidence Susceptibility in the Semnan Plain Using Entropy Model. *Journal Watershed Manage Research, 12*(23), 75-85. [In Persian] http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-1002-fa.html

Nadiri, A., Taheri, Z., Khatibi, R., Barzegari, G., & Dideban, K. (2018). Introducing a new framework for mapping subsidence vulnerability indices (SVIs): ALPRIFT. *Science of The Total Environment, 628–629*, 1043-1057. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.031

Rajabi, M., Roostaei, S., & Mataee, S. (2024). Evaluation of kermanshah plain subsidence time series using small-based radar interferometry technique (SBAS). *Quantitative Geomorphological Research, 13*(1), 1-17. [In Persian] https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.363452.1380

Raspini, F., Caleca, F., Del Soldato, M., Festa, D., Confuorto, P., & Bianchini, S. (2022). Review of satellite radar interferometry for subsidence analysis. *Earth-Science Reviews, 235*, 104239. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104239

Ren, T., Gong, W., Gao, L., & Zhao, F. (2024). Understanding land subsidence in the Pearl River Delta region of China based on InSAR observations. *Engineering Geology, 339*, 107646. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107646

Rostami, A., Entezari, M., & Zakerinejad, R. (2023). Assessment and analysis of subsidence risk in Hashtgerd Plain. *Quantitative Geomorphological Research, 12*(3), 140-156. [In Persian] https://doi.org/10.22034/gmpj.2023.414731.1454

Villaseñor-Reyes, C. I., Hernández-Madrigal, V. M., & Figueroa-Miranda, S. (2022). Identification and assessment of land subsidence development in rural areas using PS interferometry: a case study in Western Michoacan, Mexico. *Environmental Earth Sciences, 81*(16), 417. https://doi.org/10.1007/s12665-022-10545-z

Zhang, J., Ke, C., Shen, X., Lin, J., & Wang, R. (2023). Monitoring land subsidence along the subways in Shanghai on the basis of time-series InSAR. *Remote Sensing, 15*(4), 908. https://doi.org/10.3390/rs15040908

Vol. 15, No. 1, Spring 2026, p. 96-113 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.96215.1620 OPEN ACCESS

Investigation of Soil Microbial Community Dynamics across Different Ages of Haloxylon Persicum Plantations in the Arid Ecosystems of Birjand, Eastern Iran

Morteza Saberi [1*], Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleno [1], Rasool Khatibi [1], Mehdi Sarparast [2]

[1] Associate Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

[2] Department of Desert Areas Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 28 October 2025

Revised: 25 December 2025

Accepted: 27 December 2025

Available Online:

31 December 2025

Keywords:

Soil Organic Carbon (SOC)

Haloxylon Afforestation

Soil Microbial Biomass (SMB)

Arid Ecosystems

Microbial Quotient (Qmic)

ABSTRACT

This paper assessed the influence of Haloxylon Persicum plantation age on soil physical, chemical, and microbial properties in the arid ecosystems of Birjand County, South Khorasan Province, Iran. Soil sampling was conducted at three sites: two planted sites (34 and 26 years old) and one unplanted control site. Physicochemical properties, including Soil Organic Carbon (SOC), Total Nitrogen (TN), available phosphorus and potassium, pH, EC, CaCO3 content, Sodium Adsorption Ratio (SAR), bulk density, and porosity, were measured. Microbial activity, Microbial Biomass Carbon (MBC) and Nitrogen (MBN), basal and substrate-induced respiration (SIR), and catalase enzyme activity were also evaluated. The results showed that with increasing plantation age, SOC and TN increased significantly, while bulk density decreased and porosity increased, indicating an improvement in soil structure, permeability, and ventilation, as well as enhanced microbial activity. Enzyme activity, microbial biomass, and microbial population also increased significantly in older sites, while the C/N ratio and Microbial Quotient (Qmic) remained statistically unchanged, indicating the maintenance of the functional balance of the microbial community. The positive correlation of SOC and TN with microbial indices, alongside the negative correlation of the C/N ratio, bulk density, and CaCO3 content, highlights the importance of physicochemical properties in determining soil health. These results indicate that long-term Haloxylon afforestation enhances soil quality, microbial activity, and the ecological capacity of desert ecosystems, providing a solid foundation for sustainable soil management and dryland restoration.

* Corresponding author: Morteza Saberi E-mail address: mortezasaberi@uoz.ac.ir

How to cite this article: Saberi, M., Dahmardeh Ghaleno, M. R., Khatibi, R., & Sarparast, M. (2026). Investigation of Soil Microbial Community Dynamics across Different Ages of Haloxylon Persicum Plantations in the Arid Ecosystems of Birjand, Eastern Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 15*(1), 96-113. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.96215.1620

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Desertification, the most severe form of land degradation in arid and semi-arid regions worldwide, leads to a decline in biodiversity, reduced ecosystem stability, and detrimental alterations in ecosystem structure and function. Vegetation restoration, particularly using resilient native species such as *Haloxylon persicum*, is recognized as a highly effective strategy to combat desertification and restore local habitats. Soil microbial communities play a critical role in maintaining the stability and functionality of these arid ecosystems, especially through their key involvement in carbon and nitrogen cycling. However, comprehensive data on the changes in soil physical, chemical, and microbial properties **across** a gradient of Haloxylon plantation ages remain limited. This is particularly true in arid regions of eastern Iran, such as Birjand, where the long-term influence of native afforestation on soil structure and biological function has yet to be fully elucidated. The present study was designed to investigate the dynamics of the soil microbial community at various plantation ages and analyze their relationships with soil physicochemical properties. Its novelty lies in the integrated, multifaceted assessment of soil properties and microbial communities throughout different stand ages. This approach facilitates a deeper understanding of the plant-soil-microbe interactions and helps identify mechanisms influencing long-term ecosystem restoration. The results are expected to provide practical information for optimizing afforestation schemes, enhancing the resilience of arid ecosystems, and establishing a robust scientific basis for sustainable land restoration strategies.

Material and Methods

To investigate the effect of plantation age on the dynamics of the soil microbial community, this study was conducted in three distinct sites: two plantations aged 34 and 26 years, along with one unplanted control area, in the Merak region of Birjand city (South Khorasan province). Sampling was carried out in June 2025 using a systematic random method, with six sampling points selected as replicates at each site. At each replicate, soil samples were collected from a depth of 0 to 30 cm after removing the surface litter and transported separately to the laboratory. The physicochemical properties of the soil including Soil Organic Carbon (SOC), Total Nitrogen (TN), available phosphorus and potassium, pH, Electrical Conductivity (EC), porosity, bulk density, calcium carbonate content (CaCO3), and Sodium Adsorption Ratio (SAR) were measured. Soil microbial characteristics were assessed using standard methods, including catalase enzyme activity, basal and substrate-induced respiration (SIR), Microbial Biomass Carbon (MBC) and Nitrogen (MBN), and microorganism population (MPN). The Microbial Quotient (Qmic) was calculated as the ratio of MBC to SOC. After verifying normality and homogeneity of variances, the data were analyzed using one-way analysis of variance (ANOVA) within a completely randomized design. Relationships between physicochemical and microbial parameters were examined using Principal Component Analysis (PCA) and Pearson correlation coefficients in R software.

Results and Discussion

The results of this study showed that long-term Haloxylon afforestation significantly affects the physicochemical and microbial properties of soil in the arid ecosystems of the Birjand region. Analysis of variance revealed a significant impact of Haloxylon plantation on indicators such as SOC, TN, available potassium, pH, EC, CaCO3, SAR, bulk density, and porosity, while available phosphorus showed no significant change. Increasing the age of the Haloxylon stand was associated with a significant increase in organic carbon (1.73 to 18.7 g/kg) and more than a fourfold increase in total nitrogen compared to the control site. This indicates the substantial accumulation of organic matter, development of a robust root system, and enhancement of soil microbial activity. The decrease in bulk density and corresponding increase in porosity suggest improvements in soil structure, water permeability, and aeration. Changes in pH, EC, CaCO3, and SAR reflect adjustments in soil salinity and sodicity over time due to plant presence. Regarding microbial properties, catalase enzyme activity, basal and SIR, as well as MBC and MBN, increased significantly with the age of the Haloxylon plantation, indicating enhanced metabolic and

ecological capacity of the soil. Microbial population and diversity improved in older cultivation sites, while the C/N ratio and the Microbial Quotient (Qmic) remained relatively stable, suggesting the maintenance of a functional balance within the microbial community. Positive correlations between SOC and TN with microbial indices, alongside negative correlations of the C/N ratio, bulk density, and CaCO3 content with microbial activity, underscore the importance of these physicochemical indices in determining overall soil health and biological performance. These findings emphasize that long-term Haloxylon afforestation improves soil fertility, promotes microbial activity, and increases the ecological stability of dry ecosystems, playing a key role in soil stabilization and improving its biological performance.

Conclusion

The results of this study showed that long-term Haloxylon afforestation in the arid ecosystems of Birjand has a significant and positive effect on the physical, chemical, and microbial properties of the soil. With increasing stand age, total SOC and TN increased significantly, indicating the substantial accumulation of organic matter from litterfall, root activity, and enhanced microbial turnover. The decrease in bulk density and increase in porosity demonstrate the improvement of soil structure, permeability, and the creation of suitable habitat conditions for microbial growth. Physicochemical changes, including the adjustment of soil salinity and sodicity and the reduction of CaCO3 content and SAR, highlight the positive long-term effects of Haloxylon afforestation on overall soil quality. Microbial indicators such as catalase enzyme activity, basal and SIR, as well as MBC and MBN also increase with the age of the Haloxylon plantation, demonstrating enhanced metabolic and ecological capacity of the soil. The population and diversity of microorganisms in older *Haloxylon persicum* stands improved, while the carbon-to-nitrogen ratio and Qmic remained stable, suggesting the maintenance of functional balance within the microbial community. The positive correlation of SOC and TN with microbial indices and the negative correlation of C/N ratio, bulk density, and CaCO3 with microbial activity highlights the critical role of physicochemical properties in soil health. PCA analysis identified the first axis as the main factor separating the sites, with SOC, TN, and MBC contributing the most to explaining the observed differences. These findings indicate that long-term Haloxylon afforestation enhances soil quality, microbial activity, and the ecological capacity of desert ecosystems, providing valuable insights for sustainable soil management and restoration.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support of the University of Zabol (Grant code: IR-UOZ-GR-8721) for conducting this research.

جلد ۱۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۱۱۳-۹۶ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.96215.1620 دسترسی آزاد

بررسی پویایی جامعه میکروبی خاک در سنین مختلف تاغ‌کاری در اکوسیستم‌های خشک بیرجند، شرق ایران

مرتضی صابری[1*]، محمدرضا دهمرده قلعه نو[1]، رسول خطیبی[1]، مهدی سرپرست[2]

[1] گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران
[2] گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

کلمات کلیدی:
کربن آلی خاک (SOC)
تاغ کاری
زیست‌توده میکروبی خاک (SMB)
اکوسیستم‌های خشک
نسبت میکروبی (Qmic)

چکیده

این مطالعه تأثیر سن تاغ‌کاری بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک در اکوسیستم‌های خشک شهرستان بیرجند، استان خراسان جنوبی را بررسی کرد. نمونه‌برداری خاک در سه سایت با سنین ۳۴ و ۲۶ سال و یک سایت بدون تاغ‌کاری انجام شد. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی شامل کربن آلی خاک، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم در دسترس، pH، EC، کربنات کلسیم، نسبت جذب سدیم، چگالی ظاهری و تخلخل اندازه‌گیری شد. همچنین فعالیت میکروبی، زیست‌توده کربن و نیتروژن میکروبی، تنفس پایه و برانگیخته و فعالیت آنزیم کاتالاز ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که با افزایش سن تاغ‌کاری، SOC و TN به طور معنی‌داری افزایش یافته و چگالی ظاهری کاهش و تخلخل افزایش یافته است، که نشان‌دهندهٔ بهبود ساختار، نفوذپذیری و تهویهٔ خاک و ارتقای فعالیت میکروبی است. فعالیت آنزیمی، زیست‌تودهٔ میکروبی و جمعیت میکروارگانیسم‌ها نیز در سایت‌های قدیمی‌تر به‌طور چشمگیری افزایش یافت و نسبت C/N و سهم میکروبی تغییر معنی‌داری نداشت، که بیانگر حفظ تعادل عملکردی جامعه میکروبی است. همبستگی مثبت SOC و TN با شاخص‌های میکروبی و همبستگی منفی C/N، چگالی ظاهری و کربنات کلسیم اهمیت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در تعیین سلامت خاک را نشان داد. این نتایج نشان می‌دهند که تاغ‌کاری بلندمدت موجب ارتقای کیفیت خاک، افزایش فعالیت میکروبی و ظرفیت اکولوژیکی اکوسیستم‌های بیابانی شده و پایه‌ای مستحکم برای مدیریت پایدار خاک و احیای اراضی خشک فراهم می‌آورد.

*نویسندهٔ مسئول: مرتضی صابری
Email: Mortezasaberi@uoz.ac.ir

مقدمه

سلامت خاک یکی از اجزای اساسی اکوسیستم‌های زمینی است و با ارائه خدمات حیاتی مانند حفظ کیفیت آب، افزایش تولید گیاهی، چرخه عناصر غذایی و تجزیه مواد آلی، نقش مهمی در پایداری محیط دارد (Tahat, Alananbeh, Othman & Leskovar, 2020). این ویژگی‌ها تحت تأثیر خصوصیات زیستی، شیمیایی و فیزیکی خاک و فعالیت میکروارگانیسم‌ها قرار دارند (Sahu, Singh, Prabha, Meena & Abhilash, 2019). تجزیهٔ مواد آلی توسط میکروب‌ها باعث بازیافت عناصر غذایی و بهبود ساختار خاک می‌شود و بدین ترتیب هم حاصلخیزی و هم سلامت اکوسیستم‌های خاکی تقویت می‌شود (Delgado-Baquerizo et al., 2017).

بیابان‌زایی یکی از شدیدترین شکل‌های تخریب اراضی در مناطق خشک جهان است و موجب کاهش تنوع و پایداری اکوسیستم‌ها، تغییر در ساختار خاک و کاهش فعالیت میکروبی می‌شود (Shi et al., 2023). کنترل بیابان‌زایی و احیای اراضی تخریب‌شده یکی از اولویت‌های مدیریت پایدار منابع طبیعی است. احیای پوشش گیاهی، به‌ویژه با استفاده از گونه‌های مقاوم بومی، یکی از مؤثرترین راهکارها برای کاهش فرسایش بادی، تثبیت خاک و بهبود عملکرد زیستی خاک به شمار می‌رود (Li, Li, Xie, Chang & Li, 2022). شواهد حاصل از پایش‌های بلندمدت، آزمایش‌های کنترل‌شده و داده‌های سنجش از دور نشان می‌دهند که بازسازی پوشش گیاهی موجب کاهش فرسایش، افزایش زیست‌توده خاک و بهبود کیفیت زیستگاه‌های محلی می‌شود (Li, Xie, Yang & Li, 2022; Chen et al., 2021; Reynolds et al., 2007).

اکوسیستم‌های خشک به دلیل محدودیت منابع آب و شرایط محیطی سخت، حساسیت بالایی نسبت به تغییرات مدیریت خاک و پوشش گیاهی دارند. احیای پوشش گیاهی نه تنها بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک اثر می‌گذارد، بلکه پویایی جوامع میکروبی خاک را نیز تغییر می‌دهد. افزایش ورودی مواد آلی، بهبود ساختار خاک و افزایش منابع غذایی موجب تقویت فعالیت و تنوع میکروارگانیسم‌ها و افزایش ظرفیت خاک برای چرخهٔ عناصر غذایی می‌شود (Reynolds et al., 2007; Li, et al., 2022). همچنین، بازسازی پوشش گیاهی می‌تواند با بهبود ورود و خروج کربن و نیتروژن، محیط مناسبی برای رشد باکتری‌ها و قارچ‌های خاک فراهم کند (Zhou et al., 2020). افزایش کربن و نیتروژن خاک پس از احیای پوشش گیاهی در مناطق مختلف بیابانی مانند فلات تبت، استپ‌های بیابانی و بیابان تنگر به‌طور گسترده گزارش شده است (Gou et al., 2019; Li, et al., 2022; Du et al., 2021). این تغییرات نه تنها تنوع و فعالیت میکروبی خاک را افزایش می‌دهند، بلکه چرخه‌های بیوشیمیایی و بازدهی اکوسیستم را نیز تقویت می‌کنند.

در ایران، به ویژه در مناطق خشک شرق کشور مانند بیرجند، گونهٔ زرد تاغ (*Haloxylon persicum*) به عنوان یک گونه بومی و مقاوم، در طرح‌های تاغ‌کاری و احیای پوشش گیاهی برای کنترل فرسایش و تثبیت خاک استفاده می‌شود. این گونه با داشتن ریشه‌های عمیق و سیستم فتوسنتزی C4 قادر است در شرایط تنش‌زا مانند خشکی و شوری به رشد خود ادامه دهد و با افزایش مواد آلی خاک، زمینه را برای فعالیت جوامع میکروبی فراهم کند (Yang & Lv, 2023). تاج پوشش و ریشه‌های این گونه با ایجاد میکروزیستگاه‌های مناسب و ترشح ترکیبات ریشه‌ای، فعالیت میکروبی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند و چرخه‌های بیوشیمیایی و فرآیندهای اکولوژیکی خاک را تقویت می‌کنند (Gomaa, Hegazy & Alhaithloul, 2023; Zhou et al., 2020). جوامع میکروبی خاک مستقیماً بر تجزیه مواد آلی، چرخهٔ عناصر غذایی و پایداری ساختار خاک تأثیر دارند (Zhan, 2024) و تنوع و ساختار جامعه میکروبی می‌تواند شاخصی برای ارزیابی بهبود کیفیت خاک و پایداری اکوسیستم باشد.

سن کاشت و مراحل رشد گیاهان تأثیر مهمی بر پویایی جوامع میکروبی خاک دارند. در مراحل اولیه، تنوع و فعالیت میکروبی محدود است، اما با گذشت زمان و افزایش مواد آلی، فعالیت و تنوع میکروبی افزایش یافته و شرایط اکولوژیکی و پایداری اکوسیستم بهبود می‌یابد (Abdi, Saleh, Majnonian & Deljouei, 2019; Gomaa et al., 2023). مطالعات نشان داده‌اند که سن جنگل‌کاری یا تاغ‌کاری بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اثر قابل توجهی دارد. برای مثال، چن و همکاران (Chen et al., 2025) گزارش

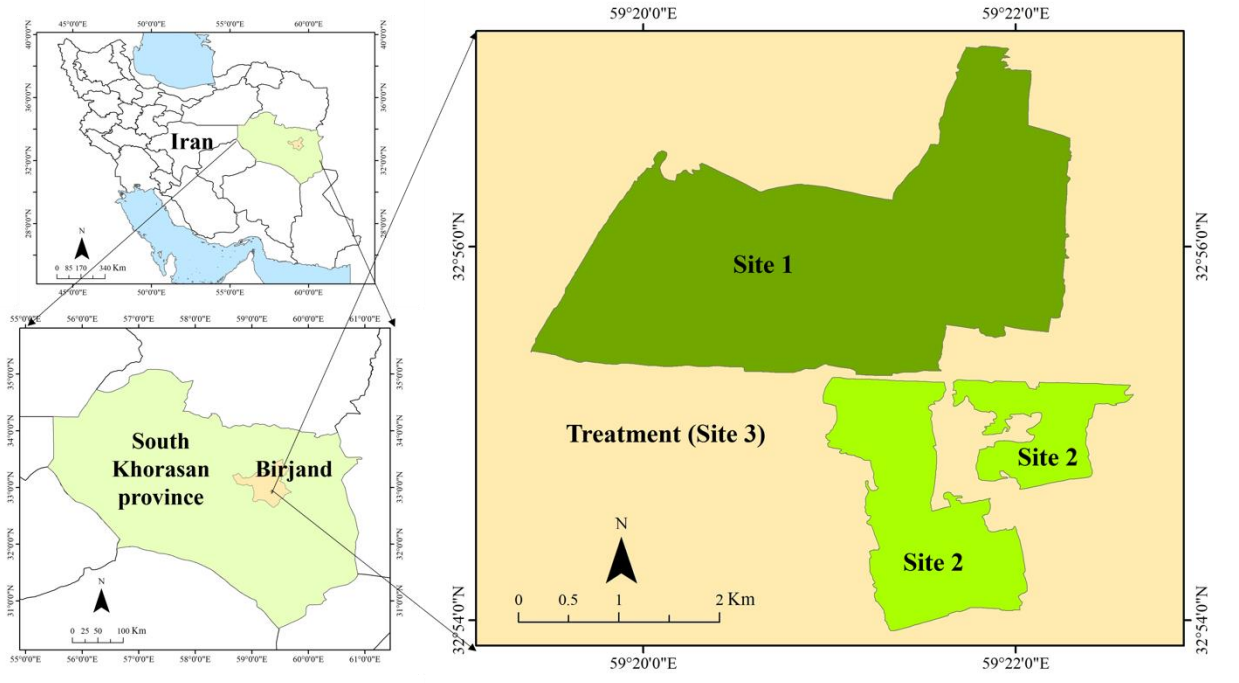
کردند که افزایش سن جنگل‌کاری موجب افزایش محتوای کربن خاک و تمرکز بالاتر کربن در لایه‌های سطحی می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهند که با گذر زمان، تاغ‌کاری می‌تواند به بهبود پایداری و سلامت اکوسیستم‌های بیابانی کمک کند و پایه علمی محکمی برای مدیریت بلندمدت ارائه نماید.

علاوه بر این، جوامع میکروبی تحت تاج پوشش زرد تاغ در سنین مختلف تغییرات قابل توجهی در ترکیب و تنوع خود دارند، که می‌تواند شاخصی برای ارزیابی اثرات تاغ‌کاری بر اکوسیستم‌های بیابانی باشد (Li et al., 2023; Arokh et al., 2021). ویژگی‌های فیزیولوژیکی و سازوکارهای تحمل خشکی زرد تاغ باعث افزایش کربن آلی و بهبود خواص شیمیایی خاک می‌شوند، به‌گونه‌ای که پس از چند دهه کاشت، شرایط مناسب برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها ایجاد شده و ساختار جامعهٔ میکروبی بهبود می‌یابد (Su & Liu, 2020; Lü et al., 2019). این تعاملات گیاه - خاک - میکروب نقش کلیدی در پایداری و بازسازی اکوسیستم‌های بیابانی ایفا می‌کنند و اهمیت بررسی پویایی میکروبی خاک در سنین مختلف تاغ‌کاری برای مدیریت پایدار خاک و ارزیابی موفقیت پروژه‌های احیا را آشکار می‌سازد.

با وجود نقش حیاتی جوامع میکروبی در پایداری و عملکرد اکوسیستم‌های خشک و چرخه‌های کربن و نیتروژن، اطلاعات جامع دربارهٔ تغییرات ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک در سنین مختلف تاغ‌کاری محدود است، به‌ویژه در مناطق خشک شرق ایران، مانند منطقهٔ بیرجند، که نقش گونه‌های مقاوم بومی در شکل‌دهی ساختار و عملکرد خاک هنوز به‌طور کامل روشن نشده است. این مطالعه با هدف بررسی پویایی جامعهٔ میکروبی و ارتباط آن با خصوصیات خاک در سنین مختلف زر تاغ طراحی شده است. نوآوری پژوهش در ارزیابی همزمان ویژگی‌های خاک و جامعه میکروبی در طول دوره رشد نهفته است، که به درک بهتر تعاملات گیاه - خاک - میکروب و شناسایی سازوکارهای مؤثر در احیای اکوسیستم کمک کرده و پایه علمی محکمی برای مدیریت پایدار تاغ‌کاری و افزایش تاب‌آوری اکوسیستم‌های خشک فراهم می‌آورد.

منطقهٔ مورد مطالعه

محدودهٔ مورد مطالعه در استان خراسان جنوبی و در شهرستان بیرجند واقع شده است. این ناحیه در فاصله‌ای حدود ۱۰ کیلومتر در جهت شمال‌شرقی شهر بیرجند قرار دارد و از نظر موقعیت جغرافیایی، منطقه بین عرض‌های جغرافیایی ″۳۲°۵۳′۲۴ تا ″۳۲°۵۷′۰۰ شمالی و طول‌های جغرافیایی ″۵۹°۱۹′۱۲ تا ″۵۹°۲۲′۳۷ شرقی گسترده شده است. مساحت سایت تاغ‌کاری شماره یک حدود ۸۲۰ هکتار برآورد شده و مجموع مساحت پهنه‌های مربوط به سایت شماره دو نیز ۳۱۳/۵ هکتار می‌باشد. ارتفاع منطقه بین ۱۶۱۰ تا ۱۸۱۰ متر از سطح دریا متغیر است (شکل ۱). پوشش گیاهی منطقه عمدتاً شامل تاغ (*Haloxylon persicum*) به صورت دست‌کاشت بوده و علاوه بر آن، گونه‌هایی نظیر عجوه (*Salsola arbuscula*)، درمنه (*Artemisia sieberi*) و لاکتوکا (*Lactuca serriola*) نیز به‌صورت پراکنده و محدود در سطح منطقه مشاهده می‌شوند.



شکل۱- موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه در استان و کشور (سایت ۱: تاغکاری ۳۴ ساله، سایت‌های ۲: تاغکاری ۲۶ ساله و سایت ۳: منطقه بدون تاغکاری)

Fig.1. Location of the study area within the province and country (Site 1: 34-year-old Haloxylon plantation; Site 2: 26-year-old Haloxylon plantation; Site 3: non-planted area)

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر سن تاغکاری بر پویایی جامعهٔ میکروبی خاک، مطالعهٔ حاضر در سه منطقهٔ تاغکاری با قدمت‌های ۳۴ و ۲۶ سال و یک منطقه شاهد بدون تاغکاری در مجاورت این سایت‌ها در منطقه مرک شهرستان بیرجند (استان خراسان جنوبی) انجام شد. این طراحی به پژوهش امکان می‌دهد تا تغییرات جمعیت، تنوع و فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک و ارتباط آن‌ها با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در طول زمان و سنین مختلف تاغکاری مورد ارزیابی قرار گیرد. عملیات نمونه‌برداری در خردادماه ۱۴۰۴ و به روش تصادفی سیستماتیک صورت گرفت. در هر منطقه، شش نقطه به عنوان تکرار برای نمونه‌برداری خاک در نظر گرفته شد و فاصلهٔ حداقل ۵۰ متر بین نقاط نمونه‌برداری رعایت شد تا اثر متقابل بین نمونه‌ها کاهش یابد. در هر تکرار، نمونه‌ها از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر پس از کنار زدن پوشش سطحی برداشت گردید. نمونه‌های برداشت‌شده از هر عمق به صورت جداگانه در کیسه‌های پلاستیکی نگهداری و به آزمایشگاه برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک منتقل شدند. مشخصه‌های خاک شامل pH خاک به روش عصاره گیری اشباع و pH متر، قابلیت هدایت الکتریکی با عصاره گل اشباع و EC متر، تخلخل به‌صورت غیرمستقیم و از روی چگالی ظاهری و چگالی حقیقی خاک محاسبه شد. چگالی ظاهری با استفاده از روش استوانه حلقه‌ای (Core Method) و چگالی حقیقی با استفاده از روش پیکنومتر (Pycnometer Method) اندازه‌گیری گردید (Chen, Baoyin & Xia, 2022). میزان کربنات کلسیم خاک به روش تیتراسیون، نسبت جذب سدیم با استفاده از عصاره اشباع خاک، کربن آلی خاک و نیتروژن کل به ترتیب با روش اکسیداسیون دی کرومات والکی و بلاک و روش کجلدال (Kamali, Sadeghipour, Souri &Mastinu, 2022) اندازه‌گیری شدند.

ویژگی‌های میکروبی خاک

برای ارزیابی ویژگی‌های میکروبی خاک، از روش‌های استاندارد و مرجع استفاده شد. آنزیم کاتالاز با اضافه کردن هیدروژن پراکسید به وسیله اسپکتروفوتومتر UV با طول موج تقریباً ۲۴۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. تنفس پایه میکروبی با روش تیتراسیون، تنفس برانگیخته به روش انکوباسیون، کربن زیست‌توده میکروبی با استفاده از روش تدخین- استخراج، نیتروژن زیست‌توده میکروبی از طریق روش تدخین با کلروفرم و انکوباسیون اندازه‌گیری شد. جمعیت میکروارگانیسم‌ها با روش بیشترین تعداد احتمالی [1] (MPN) محاسبه شد. همچنین، برای محاسبهٔ سهم میکروبی، نسبت کربن زیست‌توده میکروبی به کربن آلی کل مورد استفاده قرار گرفت (Chen et al., 2022).

تجزیه و تحلیل آماری

پس از انجام آنالیزهای آزمایشگاهی بر روی نمونه‌ها، آزمون نرمال بودن و همگنی واریانس‌ها انجام شد. با تأیید پیش‌فرض‌های آماری، داده‌ها با استفاده از تجزیه واریانس یک‌طرفه در قالب طرح کاملاً تصادفی تحلیل شدند. روابط بین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی و میکروبی با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و ضریب همبستگی پیرسون در نرم‌افزار R مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

اثر تاغ‌کاری بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) نشان داد که تاغ‌کاری اثر معنی‌داری بر اغلب ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارد. تفاوت بین سایت‌های مختلف از نظر کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم قابل دسترس، pH، EC، کربنات کلسیم، نسبت جذب سدیم، چگالی ظاهری و تخلخل در سطح احتمال یک درصد **($p\leq0.01$)** معنی‌دار بود، در حالی‌که فسفر قابل دسترس تفاوت معنی‌داری نشان نداد. افزایش معنی‌دار کربن آلی و نیتروژن کل در سایت‌های قدیمی‌تر مشاهده شد، که ممکن است ناشی از تجمع مواد آلی و توسعه ریشه‌ها و یا عوامل محیطی باشد (Guo et al., 2024). کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل مشاهده شد که ممکن است با بهبود ساختار خاک و افزایش نفوذپذیری مرتبط باشد (Chen et al., 2025). از سوی دیگر، افزایش EC و نسبت جذب سدیم احتمالاً ناشی از انتقال املاح به سطح خاک در اثر تبخیر بالا و کمبود بارندگی در مناطق خشک است. تغییر معنی‌دار در pH خاک حاکی از تأثیر ترشحات ریشه‌ای و تغییر در فرآیندهای بیوشیمیایی خاک می‌باشد (Li et al., 2022). به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سن تاغ‌کاری، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک بهبود یافته‌اند و ممکن است تاغ‌کاری نقش مهمی در ارتقای پایداری اکوسیستم‌های خشک داشته باشد.

نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۲) نشان داد که سن تاغ‌کاری اثر معنی‌داری بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارد و به طور کلی، با افزایش سن تاغ‌کاری، کیفیت خاک بهبود یافته است. مقدار کربن آلی خاک از ۱/۷۳ گرم بر کیلوگرم در سایت شاهد (بدون تاغ‌کاری) به ۷/۱۸ گرم بر کیلوگرم در سایت ۳۴ ساله افزایش یافت که نشان‌دهندهٔ تجمع مواد آلی حاصل از ریزش برگ، ریشه و بقایای گیاهی در طول زمان و افزایش فعالیت میکروبی خاک است. روند مشابهی در نیتروژن کل مشاهده شد، به طوری که مقدار آن در قدیمی‌ترین سایت بیش از چهار برابر سایت شاهد بود. این امر نشان‌دهندهٔ بهبود چرخهٔ نیتروژن و افزایش حاصل‌خیزی خاک است. پتاسیم قابل‌دسترس در تاغزارهای ۲۶ و ۳۴ ساله نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری داشت، در حالی که فسفر قابل‌دسترس تفاوت معنی‌داری بین سنین مختلف نشان نداد، که می‌تواند ناشی از کم‌تحرکی فسفر در خاک‌های آهکی مناطق خشک باشد. با افزایش سن تاغ‌کاری، مقادیر pH و EC افزایش یافت که احتمالاً ناشی از تجمع املاح محلول به دلیل تبخیر بالا و جذب انتخابی یون‌ها توسط ریشه‌ها است. در مقابل، کربنات کلسیم و نسبت جذب سدیم (SAR) کاهش یافتند. این تغییرات ممکن است

1- Most Probable Number

تا حدی ناشی از تاغ‌کاری باشند، اما علاوه بر آن می‌توانند تحت تأثیر عوامل اقلیمی، هیدرولوژیک و سایر شرایط محیطی نیز رخ دهند. بنابراین، تاغ‌کاری ممکن است در درازمدت تغییراتی در وضعیت شوری و سدیمی خاک ایجاد کند. از نظر ویژگی‌های فیزیکی، چگالی ظاهری در سایت‌های قدیمی‌تر به‌طور معنی‌داری کاهش و تخلخل خاک افزایش یافت، که این تغییرات بیانگر بهبود ساختار خاک، افزایش نفوذپذیری و تهویهٔ بهتر در اثر فعالیت ریشه‌ای و افزایش مواد آلی است.

جدول ۱- تجزیهٔ واریانس اثر سایت‌های مختلف تاغ‌کاری بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک

Table 1- Analysis of variance for the effects of different Haloxylon plantation sites on soil physicochemical properties

F	میانگین مربعات Mean Squares	درجه آزادی df		پارامترهای خاک Soil parameters
99.25**	23.38	2	بین گروه‌ها Between Groups	کربن آلی خاک
	0.23	8	درون گروه‌ها Within Groups	Soil organic carbon (g kg^{-1})
15.38**	0.14	2	بین گروه‌ها Between Groups	نیتروژن کل
	0.00	8	درون گروه‌ها Within Groups	Total Nitrogen (g kg^{-1})
453.12**	38163.4	2	بین گروه‌ها Between Groups	پتاسیم در دسترس
	84.22	8	درون گروه‌ها Within Groups	Available Potassium (mg kg^{-1})
1.08 ns	151.8	2	بین گروه‌ها Between Groups	فسفر در دسترس
	139.4	8	درون گروه‌ها Within Groups	Available Phosphorus (mg kg^{-1})
13.23**	0.04	2	بین گروه‌ها Between Groups	اسیدیته
	0.003	8	درون گروه‌ها Within Groups	pH
65.11**	2.02	2	بین گروه‌ها Between Groups	هدایت الکتریکی
	0.03	8	درون گروه‌ها Within Groups	EC (dSm^{-1})
23.89**	21.77	2	بین گروه‌ها Between Groups	کربنات کلسیم
	0.91	8	درون گروه‌ها Within Groups	$CaCo_3$
32.06**	1.71	2	بین گروه‌ها Between Groups	نسبت جذب سدیم
	0.05	8	درون گروه‌ها Within Groups	Sodium Adsorption Ratio
57.57**	0.02	2	بین گروه‌ها Between Groups	چگالی ظاهری
	0.00	8	درون گروه‌ها Within Groups	Bulk Density (gcm^{-3})
20.32**	88.11	2	بین گروه‌ها Between Groups	تخلخل
	4.32	8	درون گروه‌ها Within Groups	Porosity (%)

** ، ns به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد و عدم معنی‌داری

**, ns: indicate significance at the 1% probability level and non-significance, respectively.

در مطالعهٔ حاضر، تأثیر سن تاغ‌کاری بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در اکوسیستم‌های خشک بیرجند بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش سن تاغ‌کاری، مقادیر کربن آلی و نیتروژن کل خاک به طور معنی‌داری افزایش یافت، که این امر نشان‌دهندهٔ تجمع مواد آلی ناشی از ریزش برگ، فعالیت ریشه‌ها و بقایای گیاهی و در نتیجه افزایش فعالیت میکروبی خاک است. مطالعات نشان داده‌اند که جنگل‌کاری بلندمدت می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک داشته باشد. این فرآیندها موجب بهبود چرخه نیتروژن و ارتقای حاصل‌خیزی خاک می‌شوند. برای مثال، ژنگ و همکاران (Zheng et al., 2024) گزارش کردند که در جنگل‌های کاشته شده با سن بیش از ۲۰ سال، مقادیر کربن آلی خاک، نیتروژن ، زیست‌توده میکروبی و فعالیت‌های آنزیمی به طور معنی‌داری افزایش یافته است، که این امر نشان‌دهندهٔ بهبود حاصلخیزی و ظرفیت خاک برای حمایت از جوامع میکروبی است.

همچنین، کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل در سایت‌های قدیمی‌تر نشان‌دهندهٔ بهبود ساختار خاک، افزایش نفوذپذیری و تهویهٔ بهتر به واسطهٔ فعالیت ریشه‌ها و تجمع مواد آلی است.

افزایش pH و EC و کاهش کربنات کلسیم و نسبت جذب سدیم (SAR) نیز حاکی از آن است که تاغ‌کاری ممکن است بر کیفیت شوری و سدیمی خاک تأثیر داشته باشد، اگر چه در برخی مناطق خشک، تجمع املاح ناشی از تبخیر بالا همچنان مشاهده می‌شود و افزایش EC لزوماً به معنای بهبود کیفیت خاک نیست بلکه می‌تواند نشانهٔ تشدید شوری باشد. این نتایج با مطالعات مشابه در سایر مناطق خشک همخوانی دارد. برای مثال، در مطالعه‌ای در چین، افزایش سن جنگل‌کاری منجر به افزایش محتوای کربن آلی خاک و غلظت بالاتر کربن در لایه‌های سطحی خاک شد (Guo et al., 2024). همچنین، در مطالعه‌ای دیگر، افزایش سن جنگل‌کاری موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و افزایش کیفیت خاک شد (Yao et al., 2023). در نهایت، مطالعه‌ای در ایالات متحده نشان داد که با افزایش سن جنگل‌کاری، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به‌طور معنی‌داری بهبود می‌یابند (Yesilonis, Szlavecz, Pouyat, Whigham & Xia, 2016). مشاهده شد که با افزایش سن جنگل‌کاری، محتوای کربن خاک افزایش یافته و لایه‌های سطحی خاک دارای بالاترین غلظت کربن هستند (Chen et al., 2025). این یافته‌ها با نتایج مطالعهٔ حاضر تا حدی هم‌راستا هستند، هرچند تأثیر دقیق تاغ بر این تغییرات نیازمند بررسی بیشتر و در نظر گرفتن عوامل محیطی است.

جدول ۲- مقایسهٔ میانگین اثر سن تاغ‌کاری بر خصوصیات فیزیکی خاک

Table 2- Comparison of the Mean Effect of Haloxylon Plantation Age on Soil Physical Properties

پارامترهای خاک Soil parameters	سن سایت‌های تاغ‌کاری The age of Haloxylon plantation sites		
	۰ سال 0 years	۲۶ سال 26 years	۳۴ سال 34 years
کربن آلی خاک Soil organic carbon (g kg^{-1})	1.73 ± 0.1^{c}	3.42 ± 0.2^{b}	7.18 ± 0.8^{a}
نیتروژن کل Total Nitrogen (g kg^{-1})	0.14 ± 0.02^{c}	0.35 ± 0.06^{b}	0.58 ± 0.1^{a}
پتاسیم در دسترس Available Potassium (mg kg^{-1})	161.3 ± 8.9^{b}	355 ± 12.7^{a}	358.3 ± 3.05^{a}
فسفر در دسترس Available Phosphorus (mg kg^{-1})	2.95 ± 0.15^{a}	3.81 ± 0.14^{a}	3.87 ± 0.14^{a}
اسیدیته pH	7.79 ± 0.06^{b}	7.9 ± 0.02^{a}	8.02 ± 0.07^{a}
هدایت الکتریکی Ec	2.03 ± 0.17^{c}	3.11 ± 0.14^{b}	3.64 ± 0.20^{a}
کربنات کلسیم $CaCo_3$	14.3 ± 0.45^{a}	11.2 ± 0.95^{b}	8.93 ± 1.27^{c}
نسبت جذب سدیم Sodium Adsorption Ratio	3.54 ± 0.20^{a}	2.93 ± 0.15^{b}	2.0 ± 0.30^{c}
چگالی ظاهری Bulk Density (gcm^{-3})	1.37 ± 0.02^{a}	1.28 ± 0.02^{b}	1.20 ± 0.01^{c}
تخلخل Porosity (%)	38.6 ± 2.51^{b}	45.5 ± 2.08^{a}	49.3 ± 1.52^{a}

Different letters in each row indicate a significant difference ($p<0.05$).

اثر تاغ‌کاری بر ویژگی‌های میکروبی خاک

نتایج تجزیهٔ واریانس اثر تاغ‌کاری بر خصوصیات میکروبی خاک نشان داد که سن تاغ‌کاری تأثیر معنی‌داری بر اغلب ویژگی‌های میکروبی خاک دارد ($p<0.01$). فعالیت آنزیم کاتالاز به عنوان شاخصی از پویایی زیستی و پایداری میکروبی، در سایت‌های قدیمی‌تر به طور قابل توجهی افزایش یافت که بیانگر بهبود ظرفیت اکسیداتیو و فعالیت متابولیکی خاک است. همچنین، تنفس پایه و برانگیخته میکروبی به‌طور معنی‌داری افزایش یافتند و نشان‌دهنده‌ی شدت بیشتر فرآیندهای معدنی‌شدن و تجزیه مواد آلی در تاغزارهای مسن‌تر هستند. کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی نیز با افزایش سن تاغ‌کاری رشد قابل‌توجهی داشتند که حاکی از بهبود شرایط زیست‌پذیری و تجمع مواد آلی در خاک است. در مقابل، نسبت کربن به نیتروژن زیست‌توده میکروبی و سهم میکروبی تفاوت معنی‌داری نشان ندادند که بیانگر پایداری نسبی ترکیب و کارکرد جوامع میکروبی است (جدول ۳).

جدول ۳- تجزیهٔ واریانس اثر سایت‌های مختلف تاغ‌کاری بر ویژگی‌های میکروبی خاک

Table 3- Analysis of Variance of the Effect of Different Haloxylon Plantation Sites on Soil Microbial Characteristics

F	میانگین مربعات Mean Squares	درجه آزادی df		پارامترهای خاک Soil parameters
163.4^{**}	48.46	2	Between Groups بین گروه‌ها	انزیم کاتالاز
	0.29	8	Within Groups درون گروه‌ها	Catalase Enzyme
132.0^{**}	2.17	2	Between Groups بین گروه‌ها	تنفس میکروبی پایه
	0.01	8	Within Groups درون گروه‌ها	Basal Microbial Respiration
65.1^{**}	7.10	2	Between Groups بین گروه‌ها	تنفس بر انگیخته
	0.1	8	Within Groups درون گروه‌ها	Basal respiration
205.5^{**}	17655.1	2	Between Groups بین گروه‌ها	کربن زیتوده میکروبی
	85.8	8	Within Groups درون گروه‌ها	Microbial Biomass Carbon
365.4^{**}	289.9	2	Between Groups بین گروه‌ها	نیتروژن زیتوده میکروبی
	0.79	8	Within Groups درون گروه‌ها	Microbial Biomass Nitrogen
3.32^{ns}	3.86	2	Between Groups بین گروه‌ها	کربن بر نیتروژن زیتوده میکروبی
	1.16	8	Within Groups درون گروه‌ها	MBC/ MBN
79^{**}	79.0	2	Between Groups بین گروه‌ها	جمعیت میکروارگانیسم‌ها
	1.0	8	Within Groups درون گروه‌ها	Microorganism Population
4.02^{ns}	117.4	2	Between Groups بین گروه‌ها	سهم میکروبی
	29.2	8	Within Groups درون گروه‌ها	Microbial Quotient

**، ^{ns} به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد و عدم معنی‌داری

**, ^{ns}: indicate significance at the 1% probability level and non-significance, respectively.

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که سن تاغ‌کاری تأثیر قابل توجهی بر اغلب ویژگی‌های میکروبی خاک دارد. فعالیت آنزیم کاتالاز، شاخصی از ظرفیت اکسیداتیو و عملکرد زیستی، با افزایش سن تاغ‌کاری به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، که بیانگر تقویت فعالیت متابولیکی و توانایی خاک در تجزیه مواد آلی است. تنفس پایه و تنفس برانگیخته نیز در سایت‌های مسن‌تر به ترتیب بیشترین مقادیر را نشان دادند و نشان‌دهنده افزایش شدت فرآیندهای معدنی‌شدن و گردش عناصر غذایی در خاک هستند. کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی نیز با افزایش سن تاغ‌کاری به طور چشمگیری افزایش یافتند، که نمایانگر بهبود شرایط زیست‌پذیری و تجمع مواد آلی در خاک و تقویت ظرفیت خاک برای حمایت از جوامع میکروبی است. نسبت کربن به نیتروژن زیست‌تودهٔ میکروبی در طول سنین

مختلف تغییر معنی‌داری نشان نداد، که بیانگر حفظ تعادل ترکیبی و عملکردی جامعه میکروبی است. جمعیت میکروارگانیسم‌ها نیز با افزایش سن تاغ‌کاری افزایش چشمگیری داشت، که تأکید بر رشد و توسعه جوامع میکروبی با گذشت زمان دارد. سهم میکروبی نسبت به کربن آلی، با اینکه در سایت‌های مسن‌تر کمی کاهش یافت، اما تغییرات آن معنی‌دار نبود، که نشان‌دهندهٔ پایداری نسبی نقش میکروارگانیسم‌ها در فرآیندهای خاک است. به طور کلی، این نتایج حاکی از آن است که تاغ‌کاری بلندمدت موجب ارتقای سلامت زیستی خاک، افزایش فعالیت میکروبی و تقویت پایداری اکوسیستم‌های بیابانی می‌شود.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تاغ‌کاری تأثیر معنی‌داری بر اغلب ویژگی‌های میکروبی خاک دارد و با افزایش سن تاغزار، شاخص‌های زیستی خاک به‌طور چشمگیری بهبود می‌یابند. این یافته‌ها با نتایج گزارش شده توسط لی و همکاران (Li et al., 2022)، ژان (Zhan, 2024)، دو و همکاران (Du et al., 2021) و یانگ ولو (Yang & Lv, 2023) مطابقت دارد که نشان دادند افزایش سن جنگل‌کاری یا احیای پوشش گیاهی در مناطق خشک موجب بهبود شاخص‌های زیستی و افزایش فعالیت میکروبی خاک می‌شود. مطالعه‌ای در چین نشان داد؛ در جنگل‌های کاشته شده با سن بیش از ۲۰ سال، افزایش معنی‌داری در کربن آلی خاک، نیتروژن، زیست‌تودهٔ میکروبی و فعالیت‌های آنزیمی وجود دارد (Zheng et al., 2024). افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در تاغزارهای مسن‌تر، نشان‌دهندهٔ ارتقای ظرفیت اکسیداتیو و پایداری زیستی خاک است. این آنزیم با خنثی‌سازی پراکسید هیدروژن و تجزیه ترکیبات آلی نقش مهمی در حفظ سلامت میکروبی خاک ایفا می‌کند (Tahat et al., 2020). در تاغزارهای قدیمی‌تر، افزایش بقایای گیاهی، بهبود تهویه و تجمع مواد آلی موجب تحریک سنتز این آنزیم شده است (Yang & Lv, 2023). این موضوع بیانگر آن است که توسعهٔ سیستم ریشه‌ای و ترشحات ریشه‌ای تاغ، بستر مناسبی برای فعالیت میکروارگانیسم‌های هوازی فراهم می‌آورد (Gomaa, Hegazy & Alhaithloul, 2023). افزایش معنی‌دار تنفس پایه و تنفس برانگیخته میکروبی نیز بیانگر رشد فعالیت متابولیکی و شدت بیشتر فرآیندهای معدنی شدن در تاغزارهای مسن‌تر است. این یافته با نتایج مطالعات مشابه در اکوسیستم‌های بازسازی‌شده هم‌خوانی دارد (Yang, Zou, Yang & Lin, 2016; Zhou et al., 2020; Cheng et al., 2013). افزایش تنفس می‌تواند ناشی از افزایش دسترسی به کربن آلی قابل‌تجزیه، افزایش رطوبت خاک و بهبود ساختار خاک باشد (Du et al., 2021). در واقع، توسعه پوشش گیاهی موجب افزایش ورودی مواد آلی از طریق ریزش برگ، ترشحات ریشه و بقایای زیستی شده که محیطی مطلوب برای رشد و فعالیت میکروبی فراهم می‌کند (Li et al., 2022).

افزایش کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی در تاغزارهای مسن‌تر نشان می‌دهد که خاک در طول زمان ظرفیت بیشتری برای حمایت از جوامع میکروبی پیدا می‌کند. این روند احتمالاً ناشی از بهبود وضعیت حاصلخیزی خاک و افزایش ذخیره مواد آلی است که به واسطه توسعه پوشش گیاهی و تجمع بقایای گیاهی ایجاد می‌شود. یافته‌های ما با مطالعه ژنگ و همکاران (Zhang et al., 2025) همسو است، که در اراضی بازسازی‌شده در چین گزارش کردند بازسازی پوشش گیاهی منجر به افزایش قابل توجه زیست‌توده میکروبی کربن (MBC) و نیتروژن (MBN) شده است. در این مطالعه، افزایش MBC و MBN با بهبود ترکیب شیمیایی خاک، افزایش مواد آلی و تقویت فعالیت میکروبی همزمان بود، که نشان‌دهندهٔ اثرات مثبت بلندمدت بازسازی پوشش گیاهی بر ظرفیت خاک برای حمایت از جوامع میکروبی است. مطالعات مشابه نشان می‌دهند که افزایش سن تاغ‌کاری یا سایر گونه‌های مقاوم به خشکی، شرایط زیست‌محیطی خاک را بهبود می‌بخشد و محیط مناسبی برای رشد میکروب‌های خاکی فراهم می‌آورد (Li et al., 2022; Li, Cao, Chen & Han, 2025). بنابراین، یافته‌های این پژوهش نه تنها با نتایج مطالعه ژنگ و همکاران (Zhang et al., 2025) همخوانی دارد، بلکه نشان می‌دهد که اثرات تاغ‌کاری بلندمدت می‌تواند مشابه روند مشاهده شده در سایر اکوسیستم‌های بازسازی‌شده، منجر به افزایش عملکرد زیستی و ظرفیت اکولوژیکی خاک شود.

رشد همزمان C و N زیست‌توده، بدون تغییر معنی‌دار در نسبتC/N ، بیانگر پایداری ساختاری و عملکردی جامعه میکروبی است. یعنی اگر چه مقدار زیست‌تودهٔ افزایش یافته، اما ترکیب جمعیتی و کارکردی میکروب‌ها متوازن باقی مانده است (Zhan, 2024). چنین ثباتی معمولاً در اکوسیستم‌های در حال بلوغ مشاهده می‌شود که در آن‌ها چرخه‌های بیوژئوشیمیایی به سطح پایدارتری رسیده‌اند.

تحلیل داده‌ها نشان داد که جمعیت میکروارگانیسم‌ها در تاغزارهای مسن‌تر به‌طور چشمگیری توسعه یافته است، که این امر بیانگر بهبود تدریجی زیستگاه میکروبی و افزایش تنوع منابع غذایی است. در مراحل اولیه تاغ‌کاری، محدودیت منابع کربنی و نوسانات رطوبتی موجب کاهش فعالیت میکروبی می‌شود، اما با گذشت زمان و تجمع مواد آلی، شرایط محیطی خاک برای رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌ها بهبود یافته و جوامع میکروبی فعال‌تر و متنوع‌تر می‌شوند (He et al., 2024). از سوی دیگر، سهم میکروبی نسبت به کربن آلی تغییر معنی‌داری نشان نداد، که احتمالاً بیانگر حفظ تعادل نسبی میان ورودی مواد آلی و مصرف میکروبی آن‌ها در طول زمان است (Du et al., 2021).

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر سن تاغ‌کاری بر خصوصیات میکروبی خاک

Table 4- Comparison of the mean effects of Haloxylon plantation age on soil microbial properties

سن سایت‌های تاغ‌کاری The age of Haloxylon plantation sites			پارامترهای خاک Soil parameters
۳۴ سال 34 years	۲۶ سال 26 years	۰ سال 0 years	
11.76±0.55[a]	7.46±0.60[b]	3.37±0.47[c]	آنزیم کاتالاز Catalase Enzyme (µmol $KmnO_4$ g^{-1} dry soil)
2.16±0.19[a]	1.09±0.10[b]	0.48±0.02[c]	تنفس میکروبی پایه Basal Microbial Respiration (mg CO_2-C g^{-1} soil day^{-1})
4.38±0.38[a]	2.40±0.41[b]	1.34±0.07[c]	تنفس بر انگیخته Basal respiration (mg CO_2-C g^{-1} soil day^{-1})
226.3±6.42[a]	154.3±11.5[b]	73.0±9.16[c]	کربن زیتوده میکروبی Microbial Biomass Carbon (mg kg^{-1})
26.45±1.1[a]	14.76±1.0[b]	6.93±0.35[c]	نیتروژن زیتوده میکروبی Microbial Biomass Nitrogen (mg kg^{-1})
8.59±0.15[a]	10.45±0.11[a]	10.59±1.8[a]	کربن بر نیتروژن زیتوده میکروبی MBC/ MBN (mg kg^{-1})
14.0±0.98[a]	7.0±1.0[b]	4.0±1.02[c]	جمعیت میکروارگانیسم‌ها Microorganism Population (CFU $\times 10^7$ g^{-1}dry soil)
31.8±4.25[a]	42.8±2.28[a]	42.4±4.31[a]	سهم میکروبی Microbial Quotient (mgCmicg^{-1}Corg)

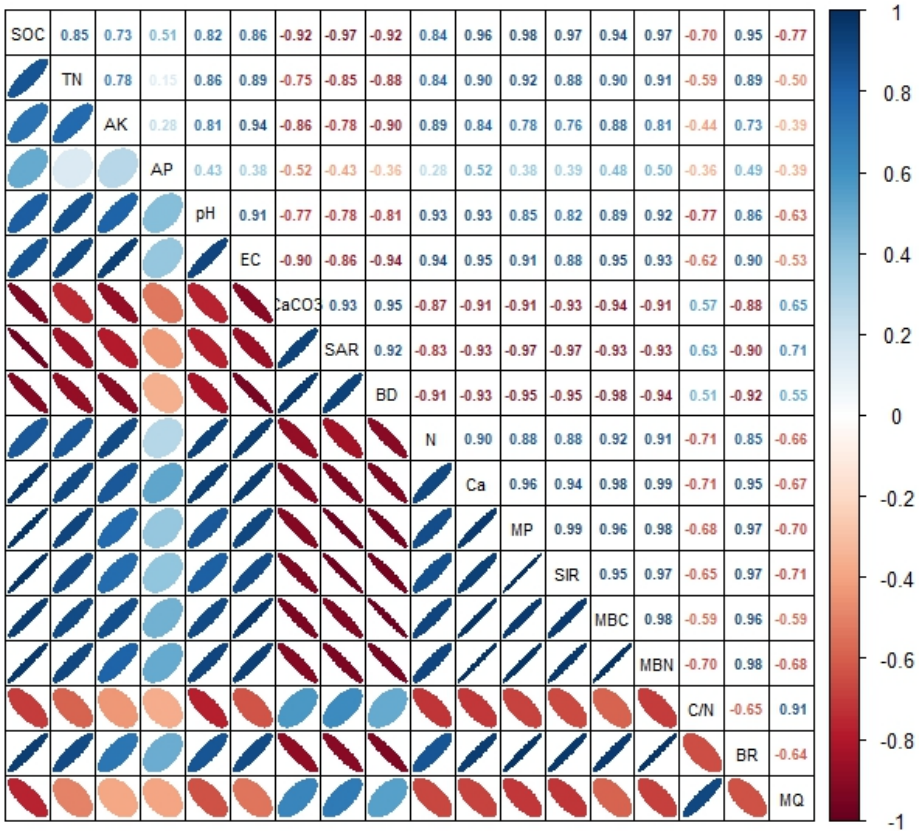
Different letters in each row indicate a significant difference ($p<0.05$).

همبستگی ویژگی‌های خاک

نتایج تحلیل همبستگی نشان داد که ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، به‌ویژه کربن آلی خاک (SOC) و نیتروژن کل (TN)، نقش محوری در پشتیبانی از فعالیت و تنوع میکروبی دارند (شکل ۲). همبستگی مثبت قوی بین SOC و TN با شاخص‌هایی مانند پتاسیم در دسترس (AK)، کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) و نیتروژن زیست‌توده میکروبی (MBN) بیانگر آن است که افزایش ذخایر مواد آلی و عناصر غذایی خاک موجب تقویت ظرفیت اکولوژیکی و فعالیت متابولیکی میکروارگانیسم‌ها می‌شود. این یافته با نتایج گزارش‌شده همخوانی دارد، که نشان دادند افزایش SOC و TN، در اکوسیستم‌های بازسازی شده موجب رشد جمعیت و فعالیت میکروبی می‌شود (Li et al., 2022; Zhang et al., 2025). در مقابل، کربنات کلسیم ($CaCO_3$)، نسبت جذب سدیم (SAR) و چگالی

ظاهری خاک (BD) با اکثر شاخص‌های میکروبی همبستگی منفی داشتند، که نشان دهندهٔ محدودیت‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در کنترل فعالیت میکروبی است. که با نتایج لی و همکاران (Li, Ma & Zhang, 2002) مطابقت دارد.

نسبت کربن به نیتروژن زیست‌توده میکروبی (C/N) در مطالعهٔ حاضر با اکثر شاخص‌های میکروبی و شیمیایی خاک همبستگی منفی نشان داد، که بیانگر کاهش کارایی تجزیه میکروبی با افزایش این نسبت است. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که C/N با فعالیت و تنوع میکروبی رابطه معکوس دارد. به طور نمونه، باستیدا و همکاران (Bastida et al., 2021) گزارش کردند که افزایش C/N در خاک‌های با محتوای بالای کربن موجب کاهش کارایی تجزیه و زیست‌توده میکروبی می‌شود. یافته‌های مطالعه حاضر با این نتایج همسو است و نشان می‌دهد که در تاغزارهای مسن‌تر، نسبت بالای C/N می‌تواند فعالیت میکروبی و سلامت خاک را به طور نسبی محدود کند. شاخص‌هایی مانند تنفس پایه (BR) و سهم میکروبی (MQ) نیز روابط مثبت و منفی متفاوتی با SOC، TN و MBC/MBN نشان دادند، که پیچیدگی تعاملات بین کیفیت خاک و فعالیت میکروبی را برجسته می‌کند.



شکل ۲– نقشهٔ حرارتی همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی (SOC: کربن آلی خاک، NT: نیتروژن کل، AK: پتاسیم قابل جذب، AP: فسفر قابل جذب، pH: اسیدیته، Ec: هدایت الکتریکی، $Caco_3$: کربنات کلسیم، SAR: سدیم قابل جذب، BD: چگالی ظاهری، N: تخلخل) و میکروبی خاک (Ca: آنزیم کاتالاز، MP: تنفس میکروبی، SIR: تنفس برانگیخته، MBC: کربن زینوده میکروبی، MBN: نیتروژن زینوده میکروبی، C/N: کربن به نیتروژن زیتوده میکروبی، BR: جمعیت میکروارگانیسم‌ها، MQ: سهم میکروبی)

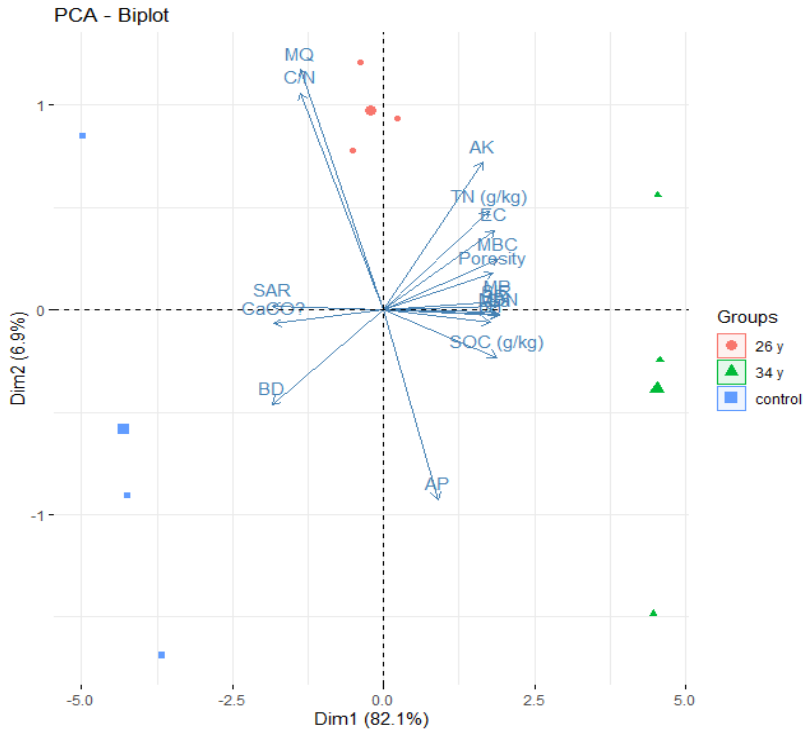
Fig.2. Pearson correlation heatmap between soil physicochemical properties (SOC: soil organic carbon, TN: total nitrogen, AK: available potassium, AP: available phosphorus, pH: acidity, EC: electrical conductivity, $CaCO_3$: calcium carbonate, SAR: sodium adsorption ratio, BD: bulk density, N: porosity) and soil microbial properties (Ca: catalase enzyme activity, MP: basal microbial respiration, SIR: substrate-induced respiration, MBC: microbial biomass carbon, MBN: microbial biomass nitrogen, C/N: microbial biomass carbon-to-nitrogen ratio, BR: microbial population abundance, MQ: microbial quotient).

نتایج PCA نیز نشان داد که محور اول، بیشترین سهم (۸۲/۰۶ درصد) را در توضیح تغییرات داده‌ها دارد و توانست منطقه بدون تاغ‌کاری و با تاغ‌کاری با سنین متفاوت را کاملاً از یکدیگر تفکیک کند، در حالی که محور دوم، با ۶/۸۷ درصد از واریانس کل، تغییرات جزئی‌تر را نشان داد (جدول ۵). جهت‌گیری متغیرهایی مانندکربن آلی خاک (SOC)، نیتروژن کل (TN)، کربن به نیتروژن زیست توده میکروبی (C/N)، کربن زیست توده میکروبی (MBC) و تخلخل (Porosity) به سمت سایت ۳۴ ساله، نشان‌دهندهٔ همبستگی مثبت این ویژگی‌ها با سن تاغ‌کاری و نقش آن‌ها در ارتقای سلامت خاک است، در حالی که ویژگی‌هایی مانند چگالی ظاهری (BD) و فسفر قابل جذب (AP) جهت مخالف محور داشتند و با سایت بدون تاغ‌کاری همبستگی منفی نشان دادند (شکل ۳). طول بردارها نیز نشان‌دهندهٔ قدرت متغیرها در تفکیک نمونه‌ها بود؛ بنابراین کربن آلی خاک، نیتروژن کل و کربن زیست‌توده میکروبی، بیشترین اثر را در توضیح تفاوت‌های بین سایت‌ها داشتند. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که PCA ابزاری مؤثر برای شناسایی متغیرهای کلیدی خاک است؛ به عنوان مثال، عبدل و همکاران (Abdel-Fattah et al., 2021) گزارش کردند که کربن آلی خاک، نیتروژن کل و کربن زیست توده میکروبی بیشترین بار عاملی را در محور اول دارند. این نتایج با یافته‌های حاضر، که نشان‌دهندهٔ همبستگی مثبت این ویژگی‌ها با سن تاغ‌کاری است، مطابقت دارد.

جدول ۵- نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بر ویژگی‌های خاک

Table 5- Results of Principal Component Analysis (PCA) on Soil Properties

محور **Axis**	مقدار شاخص ارزش ویژه **Eigen Value**	درصد واریانس **Percent of Variance**
1	14.77	82.06
2	1.23	6.87



شکل ۳- پراکنش متغییرهای خاک در تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA)

Fig.3. Distribution of soil variables in the principal component analysis (PCA)

نتیجه‌گیری

نتایج مطالعهٔ حاضر نشان داد که تاغ‌کاری بلندمدت در اکوسیستم‌های خشک بیرجند تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک دارد. با افزایش سن تاغ‌کاری، کربن آلی و نیتروژن کل خاک افزایش یافت، چگالی ظاهری کاهش و تخلخل افزایش یافت که بیانگر بهبود ساختار، نفوذپذیری و تهویه خاک و افزایش فعالیت میکروبی است. تغییرات فیزیکوشیمیایی شامل تعدیل شوری و کاهش کربنات کلسیم و نسبت جذب سدیم بود، که اثرات مثبت بلندمدت تاغ‌کاری بر کیفیت خاک را نشان می‌دهد.

شاخص‌های میکروبی مانند فعالیت آنزیم کاتالاز، تنفس پایه و برانگیخته، کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی نیز با افزایش سن تاغ‌کاری افزایش یافتند، در حالی که نسبت C/N زیست‌توده میکروبی و سهم میکروبی تغییر معنی‌داری نداشت و تعادل عملکردی جامعه میکروبی حفظ شد. همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و شاخص‌های میکروبی اهمیت کیفیت خاک در تعیین سلامت و عملکرد اکوسیستم را تأکید می‌کند. تحلیل PCA نشان داد که SOC، TN و MBC بیشترین سهم را در توضیح تفاوت‌ها دارند، که با نتایج مطالعات پیشین مطابقت دارد (Abdel-Fattah et al., 2021; Zhang et al., 2025).

به طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهند که اجرای طولانی‌مدت تاغ‌کاری می‌تواند به بهبود کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک، تقویت فعالیت میکروبی و ظرفیت اکولوژیکی اکوسیستم‌های بیابانی، تثبیت خاک و ارتقای حاصلخیزی منجر شود. تلفیق داده‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی نیز اطلاعات کاربردی ارزشمندی برای مدیریت پایدار خاک و برنامه‌ریزی احیای اراضی خشک فراهم می‌آورد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

Abdel-Fattah, M. K., Mohamed, E. S., Wagdi, E. M., Shahin, S. A., Aldosari, A. A., Lasaponara, R., & Alnaimy, M. A. (2021). Quantitative evaluation of soil quality using Principal Component Analysis: The case study of El-Fayoum depression Egypt. *Sustainability*, *13*(4), 1824. https://doi.org/10.3390/su13041824

Abdi, E., Saleh, H. R., Majnonian, B., & Deljouei, A. (2019). Soil fixation and erosion control by Haloxylon persicum roots in arid lands, Iran. *Journal of Arid Land*, *11*(1), 86-96. https://doi.org/10.1007/s40333-018-0021-2

Arokh, M., Nikbakhat, R., Dehghani, R., Rabbani, D., Miranzadeh, M. B., & Moosavi, G. A. (2021). Investigating the environmental status of Haloxylon plantations in Aran va Bidgol deserts (Isfahan-Iran). *International Archives of Health Sciences*, *8*(1), 31–36. https://iahsj.kaums.ac.ir/article_174248.html

Bastida, F., Eldridge, D. J., García, C., Kenny Png, G., Bardgett, R. D., & Delgado-Baquerizo, M. (2021). Soil microbial diversity–biomass relationships are driven by soil carbon content across global biomes. *The ISME Journal*, *15*(7), 2081-2091. https://doi.org/10.1038/s41396-021-00906-0

Chen, H., Zhang, Z., Yang, X., Ai, X., Wang, Y., & Liu, P. (2025). Effects of forest age and stand density on the growth, soil moisture content, and soil carbon content of Populus simoni plantations in the sandy area of western Liaoning, Northeast China. *Scientific Reports*, *15*(1), 2499. https://doi.org/10.1038/s41598-025-86215-4

Chen, L., Baoyin, T., & Xia, F. (2022). Grassland management strategies influence soil C, N, and P sequestration through shifting plant community composition in semi-arid grasslands of northern China. *Journal of Ecological Indicator*, *34*, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108470

Chen, Y., Huang, X., Huang, J., Liu, S., Lu, D., & Zhao, S. (2021). Fractional Monitoring of Desert Vegetation Degradation, Recovery, and Greening Using Optimized Multi-Endmembers Spectral Mixture Analysis in a Dryland Basin of Northwest China. *GIScience & Remote Sensing*, *58*(2), 300–321. https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1883940

Cheng, F., Peng, X., Zhao, P., Yuan, J., Zhong, C., Cheng, Y., ... & Zhang, S. (2013). Soil microbial biomass, basal respiration, and enzyme activity of main forest types in the Qinling Mountains. *PLoS ONE, 8*(6), e67353. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067353

Delgado-Baquerizo, M., Trivedi, P., Trivedi, C., Eldridge, D., Reich, P., Jeffries, T., & Singh, B. (2017). Microbial richness and composition independently drive soil multifunctionality. *Functional Ecology, 31*, 2330–2343. https://doi.org/10.1111/1365-2435.12924

Du, L., Zeng, Y., Ma, L., Qiao, C., Wu, H., Su. Z., & Bao, G. (2021). Effects of Anthropogenic Revegetation on the Water and Carbon Cycles of a Desert Steppe Ecosystem. *Agricultural & Forest Meteorology, 300*, 108339. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108339

Gomaa, N. H., Hegazy, A. K., & Alhaithloul, H. A. S. (2023). Facilitation by *Haloxylon persicum* shrubs enhances density and richness of soil seed bank of annual plants in a hyper-arid ecosystem. *Plants*, *12*(6), 1276. https://doi.org/10.3390/plants12061276

Gou, X., Hu, J., Chen, Y., Wei, X., Du, Z., & Zhou, Q. (2019). The effect of artificial vegetation recovery on the soil nutrients and enzyme activities in subhumid desert land on the southeast Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Ecological Engineering*, *139*, 105528. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.06.023

Guo, X., Yang, G., Wu, J., Qiao, S., & Tao, L. (2024). Impacts of forest age on soil characteristics and fertility quality of Populus simonii shelter forest at the southern edge of the Horqin Sandy Land, China. *PeerJ*, *12*, e17512. https://doi.org/10.7717/peerj.17512

He, B., Li, Q., Zou, S., Bai, X., Li, W., & Chen, Y. (2024). Dynamic changes of soil microbial communities during the afforestation of Pinus armandii in a karst region of Southwest China. *Microbial Ecology*, *87*(1), 36. https://doi.org/10.1007/s00248-024-02345-8

Kamali, N., Sadeghipour, A., Souri, M., & Mastinu, M. (2022). Variations in soil biological and biochemical indicators under different grazing intensities and seasonal changes. *Land, 11*, 1537. https://doi.org/10.3390/land11091537

Li, C. H., Ma, B. L., & Zhang, T. Q. (2002). Soil bulk density effects on soil microbial populations and enzyme activities during the growth of maize (Zea mays L.) planted in large pots under field exposure. *Canadian Journal of soil Science*, *82*(2), 147-154. https://doi.org/10.4141/S01-026

Li, C., Li, Y., Tang, L., Ikenaga, M., Liu, R., & Xu, G. (2023). Soil microbial community shifts explain habitat heterogeneity in two Haloxylon species from a nutrient perspective. *Ecology and Evolution*, *13*(1), e9727. https://doi.org/10.1002/ece3.9727

Li, X., Li, Y., Xie, T., Chang, Z., & X, Li. (2022). Recovery of Soil Carbon and Nitrogen Stocks Following Afforestation with Xerophytic Shrubs in the Tengger Desert, North China. *Catena, 214*, 106277. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106277

Li, Y., Cao, W., Chen, Y., & Han, L. (2025). Responses of soil carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry to afforestation of severely desertified land in northern China. *Ecological Indicators*, *175*, 113520. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113520

Li, Y., Xie, T., Yang, H., & Li, X. (2022). Revegetation enhances soil organic carbon mineralization and its temperature sensitivity in the Tengger Desert, North China. *Catena*, *218*, 106541. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106541

Lü, X. P., Gao, H. J., Zhang, L., Wang, Y. P., Shao, K. Z., Zhao, Q., & Zhang, J. L. (2019). Dynamic responses of Haloxylon ammodendron to various degrees of simulated drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, *139*, 121-131. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.019

Reynolds, J. F., Smith, D. M. S., Lambin, E. F., Turner, B. L., Mortimore, M., Batterbury, S. P., ... & Walker, B. (2007). Global desertification: building a science for dryland development. *Science*, *316*(5826), 847-851. https://doi.org/10.1126/science.1131634

Sahu, P., Singh, D., Prabha, R., Meena K., & Abhilash, P. (2019). Connecting microbial capabilities with the soil and plant health: options for agricultural sustainability. *Ecological Indicators, 105*, 601-612. https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2018.05.084

Shi, H., Luo, G., Hellwich, O., He, X., Kurban, A., De Maeyer, P., & Van de Voorde, T. (2023). Global dryland aridity changes indicated by atmospheric, hydrological, and vegetation observations at meteorological stations. *Hydrology and Earth System Sciences*, *27*(24), 4551-4562. https://doi.org/10.5194/hess-27-4551-2023

Su, Y., & Liu, T. (2020). Soil evolution processes following establishment of artificial sandy-fixing *Haloxylon ammodendron* forest. *Acta Pedologica Sinica*, *57*(1), 84–91. https://doi.org/10.11766/trxb201812290592

Tahat, M., Alananbeh K., Othman Y., and Leskovar D., (2020). Soil health and sustainable agriculture. *Sustainability*, *12*(12), 4859. https://doi.org/10.3390/su12124859

Yang, F., & Lv, G. (2023). Metabolomic Analysis of the Response of *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* to Drought. *International Journal of Molecular Sciences*, *24*(10), 9099. https://doi.org/10.3390/ijms24109099

Yang, N., Zou, D., Yang, M., & Lin, Z. (2016). Variations in soil microbial biomass carbon and soil dissolved organic carbon in the re-vegetation of hilly slopes with purple soil. *PLoS ONE*, *11*(12), e0166536. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166536

Yao, W., Nan, F., Li, Y., Li, Y., Liang, P., & Zhao, C. (2023). Effects of different afforestation years on soil properties and quality. *Forests*, *14*(2), 329. https://doi.org/10.3390/f14020329

Yesilonis, I., Szlavecz, K., Pouyat, R., Whigham, D., & Xia, L. (2016). Historical land use and stand age effects on forest soil properties in the Mid-Atlantic US. *Forest Ecology and Management, 370*, 83–92. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.046

Zhan, C. (2024). Microbial decomposition and soil health: Mechanisms and ecological implications. *Molecular Soil Biology, 15*, 1–10. https://doi.org/10.5376/msb.2024.15.0007

Zhang, L., Wang, H., Guo, J., Lin, W., Hui, D., Zhong, X., ... & Chen, J. (2025). Forestation of abandoned and farmed lands enhances soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus compared to grassed and forested lands: A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, *62*(9), 2296-2305. https://doi.org/10.1111/1365-2664.70109

Zheng, Y., Ye, J., Pei, J., Fang, C., Li, D., Ke, W., ... & Peñuelas, J. (2024). Initial soil condition, stand age, and aridity alter the pathways for modifying the soil carbon under afforestation. *Science of The Total Environment*, *946*, 174448. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174448

Zhou, Y., Li, X., Gao, Y., He, M., Wang, M., Wang, Y., ... & Li, Y. (2020). Carbon fluxes response of an artificial sand-binding vegetation system to rainfall variation during the growing season in the Tengger Desert. *Journal of Environmental Management*, *266*, 110556. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110556

Vol. 15, No. 1, Spring 2026, p. 114-131 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94683.1599 OPEN ACCESS

Investigating Temporal and Spatial Changes in Groundwater Pollution in the Yazd-Ardakan Plain Using the Pollution Index of Groundwater (PIG)

Somayeh Soltani Gerdefaramarzi [1*], Zahra Rahmani-Samani [1]

[1] Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resource, Ardakan University, Ardakan, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 01 August 2025

Revised: 19 November 2025

Accepted: 24 November 2025

Available Online:

28 November 2025

Keywords:

Groundwater pollution trend

Groundwater Quality Assessment

Pollution Index of Groundwater (PIG)

Groundwater Hydrogeochemistry

Yazd – Ardakan Plain

ABSTRACT

Groundwater is the main source of drinking water in the Yazd–Ardakan plain. As human activities expand, comprehensive quantitative and qualitative evaluations of the aquifer have assumed critical importance in water-resources studies. One of the indicators for evaluating groundwater quality is the Pollution Index of Groundwater (PIG). To investigate the temporal and spatial changes in groundwater quality in the Yazd-Ardakan plain, the PIG index was calculated for the years 2011 and 2021 using water quality data from 27 deep wells within the plain. The parameters included sodium, potassium, calcium, magnesium, chloride, bicarbonate, sulfate, total dissolved solids, salinity, and acidity. The results showed increases in anions, cations, acidity, and salinity, with the average of all chemical parameters except acidity and bicarbonate exceeding the permissible limits recommended by WHO. According to the PIG index in 2011, 51.43% of the total plain area had low and negligible pollution, 9.58% had moderate pollution, 10.83% had high pollution, and 28.16% had very high pollution. Only after ten years, groundwater quality declined so that 24.80% had low and negligible pollution, 23.94% moderate pollution, 9.12% high pollution, and 42.04% very high pollution. In other words, a larger area of the plain fell into the very high pollution category, and the area with low and negligible pollution decreased. According to the results, groundwater quality, especially in the northern and southern parts of the Yazd-Ardakan plain, is in a worse condition compared to other areas of the study region and requires special management and protective measures to improve the quality and quantity of groundwater resources.

* Corresponding author: Somayeh Soltani Gerdefaramarzi E-mail address: ssoltani@ardakan.ac.ir

How to cite this article: Soltani Gerdefaramarzi, S., & Rahmani-Samani, Z. (2026). Investigating Temporal and Spatial Changes in Groundwater Pollution in the Yazd-Ardakan Plain Using the Pollution Index of Groundwater (PIG). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *15*(1), 114-131. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.94683.1599

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Assessing the health and contamination of groundwater for drinking purposes is of utmost importance because these water resources are a primary source of potable water in many regions worldwide. Groundwater contamination can stem from various factors, including the infiltration of chemicals, microbial pollution, the improper use of fertilizers and agricultural pesticides, and unsanitary wastewater disposal practices, which, if consumed, can lead to various diseases and serious health problems in humans. Therefore, continuous monitoring of groundwater quality and conducting precise tests to identify and control contamination are essential to ensure public health and prevent environmental and health hazards. The Yazd-Ardakan plain, located in the center of the Iranian plateau with a very arid climate and low rainfall, relies primarily on groundwater resources to supply the water needed for the cities located in this plain. Due to excessive extraction and declining water levels, the region's aquifers face challenges such as land subsidence and reduced water quality. The groundwater pollution index is an important indicator in assessing groundwater quality, developed to measure water pollution with the aim of simplifying and standardizing laboratory results. This index is designed to summarize multiple water quality parameters such as pH, anion and cation concentrations, and dissolved solids into a single number, allowing for easy comparison and analysis of pollution levels within a specific range. It was developed in response to the need for quantitative and understandable methods for environmental decision-making and groundwater resource management. The use of composite indices such as PIG has become prevalent in recent decades with the advancement of analytical technologies and the need for rapid assessment of water quality in environmental studies. This index was first proposed by Subba Rao (2012). He showed that potassium, magnesium, calcium, sulfate, sodium, chloride, bicarbonate, as well as total dissolved solids in water and acidity are effective in determining this index. Although this index has been used in many parts of the world to assess groundwater quality, there are few studies in Iran, and those that exist are in the Birjand plain. The aim of this research is to assess the quality of groundwater in the Yazd-Ardakan plain using the PIG index, which has not been evaluated in this region so far. As a result, to investigate the temporal and spatial changes in groundwater quality, zoning maps of each element were drawn using GIS software, the PIG index was calculated for 27 deep wells in the region in 2011 and 2021, and finally, based on the results of the PIG index, the groundwater of the study area was classified in terms of pollution. This comparative information can help to formulate monitoring and management programs for Yazd-Ardakan groundwater resources by considering similar experiences.

Material and Methods

The Yazd–Ardakan Plain is one of the largest plains in Yazd Province. It lies between 53°15′ and 54°50′ east longitudes and between 31°15′ and 32°15′ north latitudes. The area of this plain is equal to 11775 square kilometers and includes the cities of Yazd, Ardakan, Meybod, Taft, Askezar and Mehriz. This plain is located in the arid belt of the central plateau of Iran and has an average annual temperature between 12 to 19 degrees Celsius, low and relatively constant relative humidity in the range of 30 to 50 percent, very high evaporation between 220 to 3200 mm per year, and an average annual rainfall of about 107 mm. To conduct this research, registered statistics regarding the water quality of wells in the Yazd-Ardakan plain for the years 2011 and 2021 were initially collected from the Yazd Province Regional Water Company. In this study, to investigate the qualitative parameters of groundwater resources, data from 27 wells with long-term and complete statistical periods and a good distribution in the study area were used, and groundwater quality maps for the years 2011 and 2021 were drawn for each of the chemical variables in the GIS software environment using the IDW interpolation method. The parameters studied in this research include the concentration of anions and cations, calcium, potassium, magnesium, sodium, chloride, bicarbonate, sulfate, acidity, sodium adsorption ratio, total dissolved solids, and electrical conductivity of water.

Results and Discussion

The results indicate that over a 10-year period, the levels of anions and cations, acidity, and salinity have increased, while the quality of the region's groundwater has declined. The average values of all chemical parameters, except for acidity and bicarbonate, exceed the permissible limits recommended by the World Health Organization (WHO). As the zoning results show, the concentration of cations, anions, and salinity in the year 2011 is highest in the north and part of the south of the plain and decreases toward the center of the plain, such that the lowest values are observed in the east, west, and center of the plain. Except for bicarbonate, which shows its highest amount in the east and center of the plain. The highest amounts reported are calcium 478.91, magnesium 283.99, sodium 2600.33, potassium 10.94, chloride 3823.65, bicarbonate 464.82, and sulfate 1998.34 mg per liter, with salinity at 13317.5 micromhos per centimeter. The highest acidity (8.05) and sodium absorption ratio (29.17) are also found in the northern part of the plain. Over the 10-year period, the groundwater quality of Yazd-Ardakan plain shows significant changes, so that the chemical element concentration zoning maps in 2021 compared to 2011 indicate changes. This means that both the maximum values of these parameters have increased, and except for the northern parts and some of the southern plain, the concentration of some elements in the east and center of the basin has also risen. In other words, temporally the groundwater quality of the plain has deteriorated, and spatially, larger areas of the plain have experienced a decline in groundwater quality.

Conclusion

The results of the temporal trend analysis of the PIG index showed that this index has been increasing over time, with a more noticeable increase in the northern part of the plain. Specifically, the well located at Dom Kaftar in the northern area of the plain experienced a significant increase (66%), with the PIG index rising from 6.73 to 11.20. Furthermore, the results indicate that over time, the quality of groundwater in the Yazd-Ardakan plain has deteriorated from the north and south towards the center of the plain. It can be concluded that this decline in quality is attributed to several factors. These include the lowering of the water table due to land use changes and excessive groundwater extraction, alongside a decrease in rainfall and the repeated occurrence of droughts over the 21-year study period.

Acknowledgements

The authors of the article would like to thank the Yazd Regional Water Company for providing the data required for this study.

جلد ۱۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۱۳۱-۱۱۴ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94683.1599 دسترسی آزاد

بررسی تغییرات زمانی و مکانی آلودگی آب زیرزمینی دشت یزد – اردکان با استفاده از شاخص آلودگی آب زیرزمینی (PIG)

سمیه سلطانی گردفرامرزی*[۱]، زهرا رحمانی سامانی[۱]

[۱] گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۳

کلمات کلیدی:

روند آلودگی آب‌های زیرزمینی

ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی

شاخص آلودگی آب زیرزمینی (PIG)

هیدروژئوشیمی آب‌های زیرزمینی

دشت اردکان- یزد

چکیده

سفرهٔ آب زیرزمینی منبع اصلی آب آشامیدنی در دشت یزد - اردکان است که امروزه با گسترش فعالیت‌های انسانی، ارزیابی کیفی و کمی آن جایگاه ویژه‌ای در مطالعات منابع آب دارد. یکی از شاخص‌های ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی، شاخص آلودگی آب زیرزمینی (PIG) است که تلفیقی از پارامترهای مؤثر بر کیفیت آب می‌باشد. به منظور بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان، شاخص PIG برای دو سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ با داده‌های کیفی آب زیرزمینی ۲۷ چاه عمیق در محدودهٔ دشت شامل یون‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، کلر، بی‌کربنات، سولفات و کل مواد جامد محلول، شوری و اسیدیته محاسبه و نقشه پهنه‌بندی شاخص و یون‌ها برای هر دو سال ترسیم شد. نتایج نشان داد که مقدار آنیون‌ها و کاتیون‌ها، اسیدیته و شوری افزایش و میانگین همه پارامترهای شیمیائی به جز اسیدیته و بی‌کربنات از حد مجاز توصیه شده، توسط سازمان جهانی بهداشت (WHO) بیشتر است. طبق شاخص PIG در سال ۱۳۹۰، ۵۱/۴۳ درصد از کل مساحت دشت دارای آلودگی کم و ناچیز، ۹/۵۸ درصد از مناطق دارای آلودگی متوسط، ۱۰/۸۳ درصد دشت دارای آلودگی زیاد و ۲۸/۱۶ درصد دارای آلودگی بسیار زیاد بوده است و با گذشت یک دهه کیفیت آب زیرزمینی کاهش یافته است؛ به طوری‌که ۲۴/۸۰ درصد دارای آلودگی کم و ناچیز، ۲۳/۹۴ درصد آلودگی متوسط، ۹/۱۲ درصد آلودگی زیاد و ۴۲/۰۴ درصد دارای آلودگی بسیار زیاد است. به عبارت دیگر مساحت بیشتری از دشت جزو طبقه آلودگی خیلی زیاد قرار گرفته است و از مساحت منطقه با آلودگی کم و ناچیز کاسته شده است. با توجه به نتایج به دست آمده کیفیت آب زیرزمینی به ویژه در نواحی شمالی و جنوبی دشت یزد- اردکان، وضعیت نامطلوبی نسبت به سایر مناطق محدودهٔ مطالعاتی دارد و نیازمند اقدامات مدیریتی و حفاظتی ویژه‌ای در زمینهٔ بهبود کیفیت و کمیت منابع آب زیرزمینی می‌باشد.

*نویسندهٔ مسئول: سمیه سلطانی گردفرامرزی E-mail: ssoltani@ardakan.ac.ir

مقدمه

بررسی سلامت و آلودگی آب‌های زیرزمینی برای مصارف آشامیدنی اهمیت بسیار بالایی دارد، زیرا این منابع آبی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شرب در بسیاری از مناطق جهان هستند. آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی مانند نفوذ مواد شیمیایی، آلودگی‌های میکروبی، استفاده نادرست از کودها و سموم کشاورزی و دفع غیر اصولی فاضلاب‌ها باشد که در صورت مصرف، موجب بروز بیماری‌های گوناگون و مشکلات جدی بهداشتی در انسان‌ها می‌شود (Adimalla, 2021). بنابراین، پایش مداوم کیفیت آب‌های زیرزمینی و انجام آزمایش‌های دقیق به منظور شناسایی و کنترل آلودگی‌ها ضروری است تا سلامت جامعه تضمین شده و از خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی جلوگیری شود (Ehteram & Soltani-Gerdefaramarzi, 2025). دشت یزد - اردکان در مرکز فلات ایران با اقلیم بسیار خشک و بارندگی اندک قرار دارد و تأمین آب مورد نیاز شهرهای واقع در این دشت عمدتاً به منابع آب زیرزمینی وابسته است. سفره‌های آب زیرزمینی منطقه، به دلیل برداشت زیاد و کاهش سطح ایستایی، با مشکلاتی همچون فرونشست زمین و کاهش کیفیت آب روبه‌رو هستند (Ershad-Hosseini, Keshtkar, Hosseini & Afzali, 2021). شاخص آلودگی آب‌های زیرزمینی[1] یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی است که برای سنجش میزان آلودگی آب با هدف ساده‌سازی و استانداردسازی نتایج آزمایشگاهی توسعه یافته است. این شاخص به‌گونه‌ای طراحی شده که پارامترهای متعددی از کیفیت آب مانند pH، غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها، مواد جامد محلول را در قالب یک عدد واحد خلاصه می‌کند تا بتوان به راحتی میزان آلودگی را در یک بازهٔ مشخص مقایسه و تحلیل کرد. این شاخص در پاسخ به نیاز به روش‌های کمی و قابل فهم برای تصمیم‌گیری‌های محیط زیستی و مدیریت منابع آب زمین توسعه یافته است (Djebassi, Abdeslam & Fehdi, 2021). استفاده از شاخص‌های ترکیبی مانند PIG از دهه‌های اخیر با پیشرفت فناوری‌های تحلیلی و نیاز به ارزیابی سریع کیفیت آب در مطالعات زیست‌محیطی رواج پیدا کرده است. امروزه PIG به عنوان یک ابزار مهم در پژوهش‌ها، پایش کیفیت آب زیرزمینی و برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب در مناطق مختلف جهان به کار می‌رود و امکان شناسایی سریع مناطق آلوده و تعیین اولویت‌های پاک‌سازی را فراهم می‌کند (Akakuru et al., 2022). این شاخص اولین بار توسط سوبا راو (Subba Rao, 2012) مطرح شد. او نشان داد که عناصر پتاسیم، منیزیم، کلسیم، سولفات، سدیم،کلر، بیکربنات، همچنین کل مواد محلول جامد در آب و اسیدیته در تعیین این شاخص مؤثرند (Subba Rao, 2012). هر چند این شاخص در بسیاری از مناطق دنیا برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی استفاده شده است. برای مثال یازیکی کارابولات و همکاران (Yazici-Karabulut, Kocer & Yesilnacar, 2024) در ترکیه، سوبا راو (Subba Rao, 2012)، ورما و سینق (Verma & Singh 2021)، آدیمالا (Adimalla, 2021)، سونیتا و همکاران (Sunitha, Madhavi & Srinivasa Rao, 2021) و پراساد و همکاران (Prasad et al., 2025) در هندوستان، شوبه و همکاران (Shube et al., 2024) در اتیوپی، سند و همکاران (Sanad et al., 2024) در مراکش، دجباسی و همکاران (Djebassi et al., 2021) در الجزایر، آکاکورا و همکاران (Akakuru et al., 2022) در نیجریه کیفیت آب زیرزمینی را با PIG بررسی کرده‌اند، اما در ایران مطالعات اندکی در این خصوص و تنها در دشت بیرجند وجود دارد. برای مثال ایزدی و همکاران (Izadi, KhasheiSiuki, Pourreza Bilondi & Hashemi, 2022a) کیفیت شیمیایی آبخوان دشت بیرجند را با PIG بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که آلودگی آبخوان دشت بیرجند به عناصر شیمیایی متوسط بوده و عدم رعایت مصرف بهینه از آب‌های زیرزمینی می‌تواند سبب افزایش آلودگی در آبخوان شود. همچنین راستگو و همکاران (Rastgoo, Nasiri Saleh & KhasheiSiuki, 2023) شاخص PIG را با روش AHP اصلاح کرده و نقشه همپوشانی (LPIG) برای دشت بیرجند تهیه نمودند. آن‌ها دریافتند؛ حدود ۱۷/۱ درصد دشت آلودگی خیلی زیاد داشته و نقاط با آلودگی زیاد و بسیار زیاد عمدتاً نواحی غرب و جنوب غرب آبخوان هستند که به فعالیت‌های کشاورزی مرتبط شده‌اند.

1- Pollution Index of Groundwater (PIG)

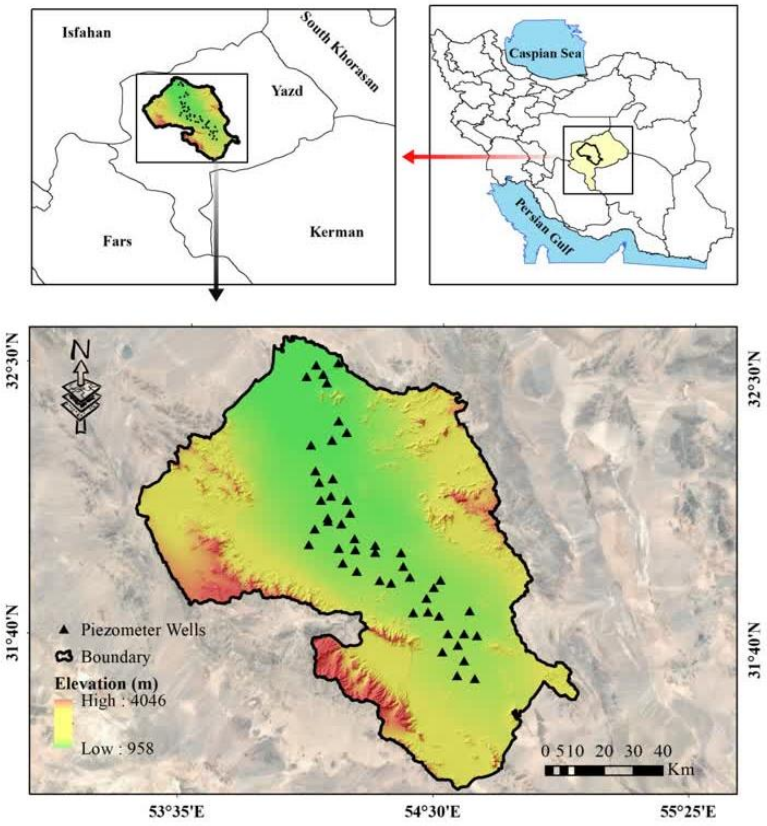
در مورد دشت یزد ـ اردکان، استفاده از PIG تاکنون گزارش نشده است، هرچند شاخص‌های مشابه در تعدادی از تحقیقات گذشته به کار رفته‌اند. به عنوان مثال قلی‌زاده و همکاران (Gholizadeh et al., 2017) پتانسیل خوردگی و رسوب‌گذاری منابع آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان را بر اساس شاخص‌های مخصوص خوردگی آب، بررسی کردند و بیشتر منابع آب منطقه را دارای خورندگی کم تا متوسط گزارش کردند. خسروی و همکاران (Khosravi, Haydari Alamdarloo & Nasabpour, 2018) و سروی صدرآباد و زارع چاهوکی (Sarvi Sadrabad & Zare Chahouki, 2022) با استفاده از شاخص کیفیت آب زیرزمینی[1]، نشان دادند کیفیت کلی آبخوان دشت یزد - اردکان در کلاس متوسط و قابل قبول است. ارشاد حسینی و همکاران (Ershad-Hosseini, Keshtkar, Hosseini & Afzali, 2021) روند تغییرات کیفی آب زیرزمینی در دشت یزد - اردکان را رو به کاهش گزارش کرده و نتیجه گرفتند که این روند در زمان‌های تخلیه یا برداشت نسبت به زمان‌های تغذیه بیشتر بوده که ناشی از کاهش بارش‌ها و پیرو آن کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی بوده است.

با وجود مطالعات انجام‌شده در دشت یزد - اردکان، بیشتر پژوهش‌ها بر شاخص‌های تک‌بعدی یا ارزیابی‌های مقطعی کیفیت آب زیرزمینی متمرکز بوده‌اند و کمتر به تحلیل‌های بلندمدت و یکپارچه پرداخته‌اند. همچنین، استفاده از شاخص‌های ترکیبی مانند PIG که قادر به تلفیق پارامترهای مختلف کیفیت آب در یک چارچوب استاندارد و قابل مقایسه است، در این منطقه تاکنون گزارش نشده است. این مطالعه با بهره‌گیری از شاخص PIG و تحلیل تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی در بازهٔ ده‌ساله (۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰) برای ۲۷ چاه عمیق در دشت یزد - اردکان، شکاف موجود در ارزیابی‌های جامع را پر می‌کند. شاخص PIG با یکپارچه‌سازی پارامترهای کلیدی نظیر pH، غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها، و مواد جامد محلول، امکان ارزیابی دقیق‌تر و سریع‌تر وضعیت آلودگی آبخوان را فراهم می‌کند و ابزار مؤثری برای شناسایی مناطق بحرانی و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی ارائه می‌دهد. تحلیل روندهای ده‌ساله این مطالعه، برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً مقطعی بوده‌اند، الگوهای بلندمدت تغییرات کیفیت آب را آشکار می‌سازد و به درک بهتر تأثیر عوامل محیطی و انسانی مانند کاهش بارش و برداشت بیش‌ازحد از آبخوان کمک می‌کند. این رویکرد نوآورانه، ارزش افزوده‌ای در بهبود برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان ایجاد می‌کند و می‌تواند به عنوان الگویی برای سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران مورد استفاده قرار گیرد.

منطقهٔ مورد مطالعه

دشت یزد - اردکان یکی از گسترده‌ترین دشت‌های استان یزد است که در طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۵۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی واقع شده است. مساحت حوزه این دشت برابر با ۱۱۷۷۵ کیلومتر مربع است و شهرستان‌های یزد، اردکان، میبد، تفت، اشکذر و مهریز را در بر می‌گیرد. این دشت در کمربند خشک فلات مرکزی ایران قرار داشته و دارای متوسط دمای سالیانه بین ۱۲ تا ۱۹ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی پایین و نسبتاً ثابت در بازهٔ ۳۰ تا ۵۰ درصد، تبخیر بسیار زیاد بین ۲۲۰ تا ۳۲۰۰ میلی‌متر در سال و بارش متوسط سالانه حدود ۱۰۷ میلی‌متر است (Ershad-Hosseini et al., 2021). منطقهٔ مورد مطالعه، رودخانهٔ دائمی ندارد و آب‌های سطحی تنها شامل رواناب‌های فصلی و احیاناً چشمه‌هایی با دبی کم در کوهپایه‌ها می‌باشد. جریانات عمدهٔ رودخانه‌های مناطق، منحصر به جریانات سیلابی است که از باران‌های شدت‌دار و بیش‌تر در مناطق کوهستانی پدیدار می‌شود. در منطقهٔ مورد مطالعه از قدیم‌الایام استفاده از منابع آب‌های زیرزمینی به وسیله قنات انجام می‌گرفته است که بعدها از طریق حفر چاه‌های عمیق و نیمه عمیق نیز این عمل میسر گردیده است و جهت عمومی آب زیرزمینی از جنوب به سمت شمال منطقه است (Khosravi et al., 2018). شکل ۱ موقعیت دشت یزد - اردکان و چاه‌های پیزومتری منطقه را نشان می‌دهد.

1- Groundwater Quality Index (GQI)



شکل ۱- موقعیت دشت یزد - اردکان و چاه‌های پیزومتری

Fig. 1. Location of the Yazd-Ardakan Plain and piezometric wells

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده

برای انجام این پژوهش ابتدا از سازمان آب منطقه‌ای استان یزد آمارهای ثبت شده کیفیت آب چاه‌های دشت یزد - اردکان برای سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ جمع‌آوری گردید. در این پژوهش جهت بررسی پارامترهای کیفی منابع آب زیرزمینی از آمار ۲۷ حلقه چاه که دارای دوره آماری طولانی مدت و کامل بودند و پراکندگی مناسبی در منطقهٔ مورد مطالعه داشتند، استفاده گردید و نقشهٔ کیفیت آب زیرزمینی در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ برای هر یک از متغیرهای شیمیایی در محیط نرم‌افزار GIS با استفاده از روش میان‌یابی IDW ترسیم شد. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل؛ غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها، کلسیم، پتاسیم، منیزیم، سدیم، کلر، بی‌کربنات، سولفات بر حسب میلی اکی والان بر لیتر، اسیدیته، نسبت جذب سدیم، مواد جامد محلول در آب بر حسب میلی گرم بر لیتر و هدایت الکتریکی آب بر حسب میکرو موس بر سانتیمتر می‌باشد. هم چنین از آمار ۶۶ چاه پیزومتری موجود در دشت استفاده گردید تا تغییرات سطح آب زیرزمینی در سال‌های آماری مورد مطالعه، بررسی شود.

شاخص آلودگی آب زیرزمینی (PIG)

شاخص PIG عددی است که برای بیان میزان آلودگی آب زیرزمینی نسبت به استانداردهای کیفی آب آشامیدنی طراحی شده است. تعیین کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص PIG طبق نظریه سوبا راو (Subba Rao, 2012) شامل ۵ مرحله زیر می‌باشد:

مرحله اول: تعیین وزن نسبی (Rw)

وزن نسبی هر پارامتر با توجه به تأثیر آن بر سلامت انسان تخصیص داده می‌شود و دامنه عددی آن بین ۱ (کمترین نقش) تا ۵ (بیشترین نقش) می‌باشد. این مقادیر توسط سوبا راو (Subba Rao, 2012) طبق جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مقادیر وزن نسبی

Table 1- Relative weight values

پارامتر شیمیایی Qualitative parameter	SO_4	HCO_3	Mg	Ca	Na	K	Cl	TDS	PH
وزن نسبی Relative weight (Rw)	5	3	2	2	4	1	4	5	5
مقدار مجاز (Ds) Standard of WHO	250	250	50	75	200	12	250	1000	8

مرحلهٔ دوم: تعیین پارامتر وزن (Wp)

برای ارزیابی نسبی هر یک از متغیرهای شیمیایی مؤثر بر کیفیت آب از رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$W_p = \frac{R_w}{\sum R_w} \quad (۱)$$

مرحلهٔ سوم: تعیین غلظت (Sc)

Sc از تقسیم غلظت هر پارامتر (C) بر مقدار مجاز آن طبق استاندارد کیفیت آب آشامیدنی (Ds) از حد مجاز استاندارد سازمان جهانی بهداشت (WHO) استفاده می‌شود رابطه (۲).

$$S_c = \frac{C}{D_s} \quad (۲)$$

مرحلهٔ چهارم: تعیین کیفیت کلی آب (Ow)

برای تعیین کیفیت کلی آب، وزن هر پارامتر در مقدار مربوطه مطابق رابطه (۳) ضرب می‌شود.

$$O_w = W_p \times S_c \quad (۳)$$

مرحلهٔ پنجم: محاسبه شاخص PIG رابطه (۴)

$$PIG = \sum O_w \quad (۴)$$

و در نهایت شاخص PIG طبق مقادیر ارائه شده توسط سوبا راو (Subba Rao, 2012) و جدول ۲ طبقه‌بندی می‌گردد.

جدول ۲- طبقه‌بندی شاخص PIG

Table 2- Classification of PIG index

طبقه‌بندی Classification	آلودگی ناچیز Insignificant pollution	آلودگی کم Low pollution	آلودگی متوسط Moderate pollution	آلودگی زیاد High pollution	آلودگی خیلی زیاد Very high pollution
Range of PIG	PIG <1.0	1.0 to 1.5	1.5 to 2.0	2.0 to 2.5	PIG >2.5

نتایج و بحث

آماره‌های توصیفی کیفیت آب زیرزمینی

آماره‌های توصیفی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان در دو سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ در جدول ۳ ارائه شده است. غلظت یون‌ها و کل مواد جامد محلول بر حسب میلی‌گرم بر لیتر و هدایت الکتریکی بر حسب میکروموس بر سانتی‌متر است. همانطور که جدول نشان می‌دهد در طول ۱۰ سال مقدار آنیون‌ها و کاتیون‌ها، اسیدیته و شوری افزایش و کیفیت آب زیرزمینی منطقه کاهش یافته است. میانگین همه پارامترهای شیمیائی به جز اسیدیته و بی کربنات از حد مجاز توصیه شده توسط سازمان جهانی بهداشت (WHO) بیشتر است. کاهش کیفیت آب زیرزمینی در منطقهٔ مورد مطالعه، می‌تواند ناشی از کاهش بارش، تأثیر رخساره‌های ژئومورفولوژی موجود و همچنین بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی، صنعت، شرب و بهداشت باشد.

جدول ۳- آمار توصیفی پارامترهای کیفیت آب

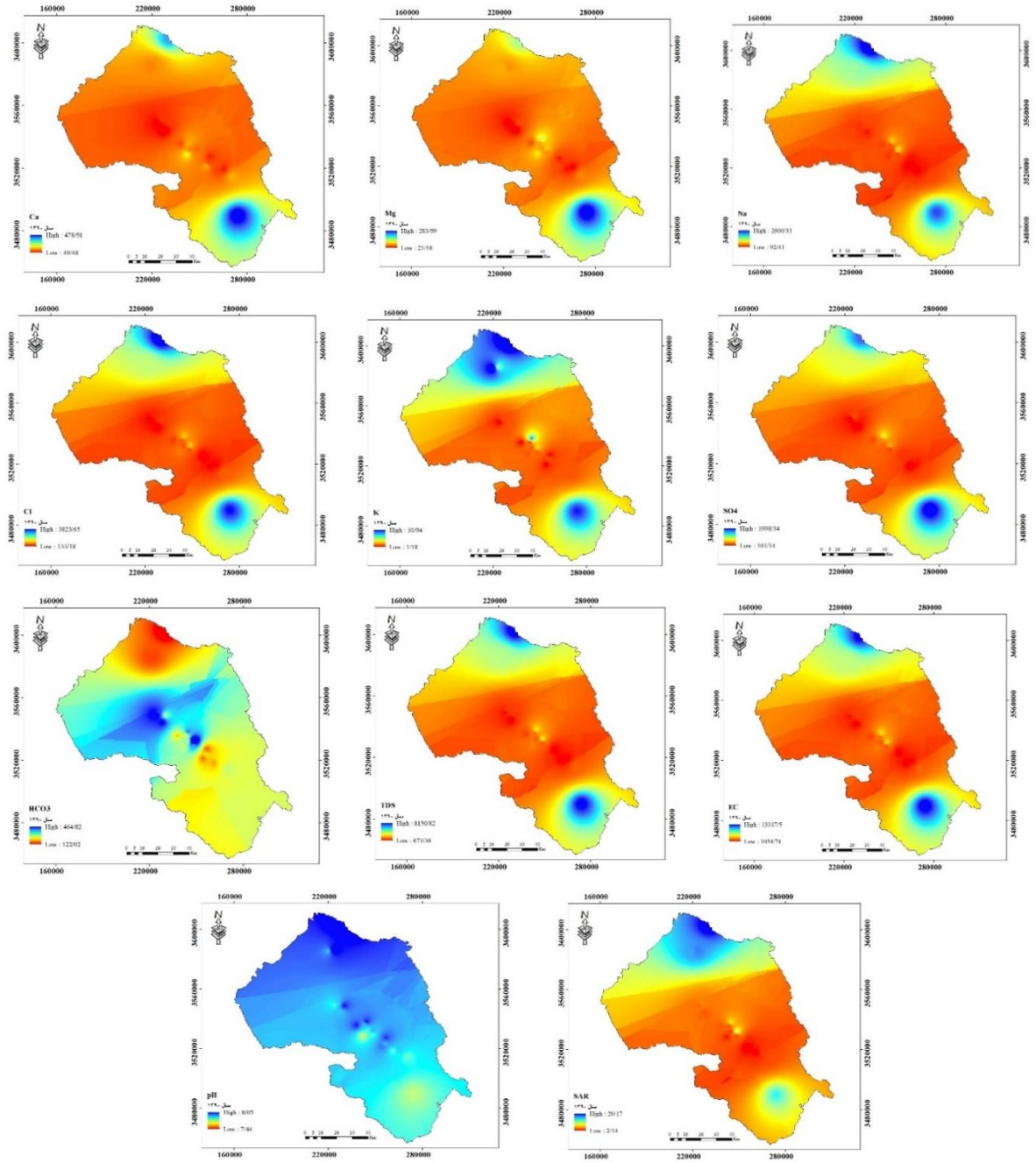
Table 3- Descriptive statistics of water quality parameters

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	Skewness	Kurtosis
2011						
SO_4	99.84	1998.72	535.08	486.79	1.55	2.27
Cl	128.45	4935.00	1082.88	1261.68	1.79	2.86
HCO_3	122.00	468.48	239.30	86.17	0.88	0.35
pH	7.40	8.06	7.72	0.17	0.07	-0.63
TDS	670.00	9820.00	2774.88	2626.49	1.41	1.18
SAR	2.10	29.18	9.22	8.28	1.38	0.80
EC	1045.00	15340.00	4365.61	4175.21	1.43	1.18
K	1.17	12.90	4.15	3.58	1.20	0.19
Na	89.93	2951.36	672.20	791.05	1.76	2.53
Mg	20.88	426.12	98.23	93.83	2.20	5.37
Ca	40.00	479.00	164.22	127.72	1.38	0.773
2021						
SO_4	102.24	2488.32	686.82	609.78	1.22	1.31
Cl	136.15	5685.12	1391.59	1591.04	1.48	1.51
HCO_3	136.64	473.36	227.51	89.27	1.09	0.54
pH	6.89	8.15	7.51	0.31	0.44	-0.32
TDS	253.00	11180.00	3223.30	3169.10	1.17	0.31
SAR	1.57	24.03	8.57	7.00	1.17	0.01
EC	976.00	17210.00	5153.11	4809.15	1.14	0.26
K	1.17	10.17	3.55	2.52	1.49	1.75
Na	65.09	5334.72	866.04	1168.84	2.60	8.05
Mg	17.04	984.96	199.46	221.95	2.01	5.14
Ca	44.80	1073.28	256.66	247.88	1.70	3.44

توزیع مکانی غلظت یون‌ها

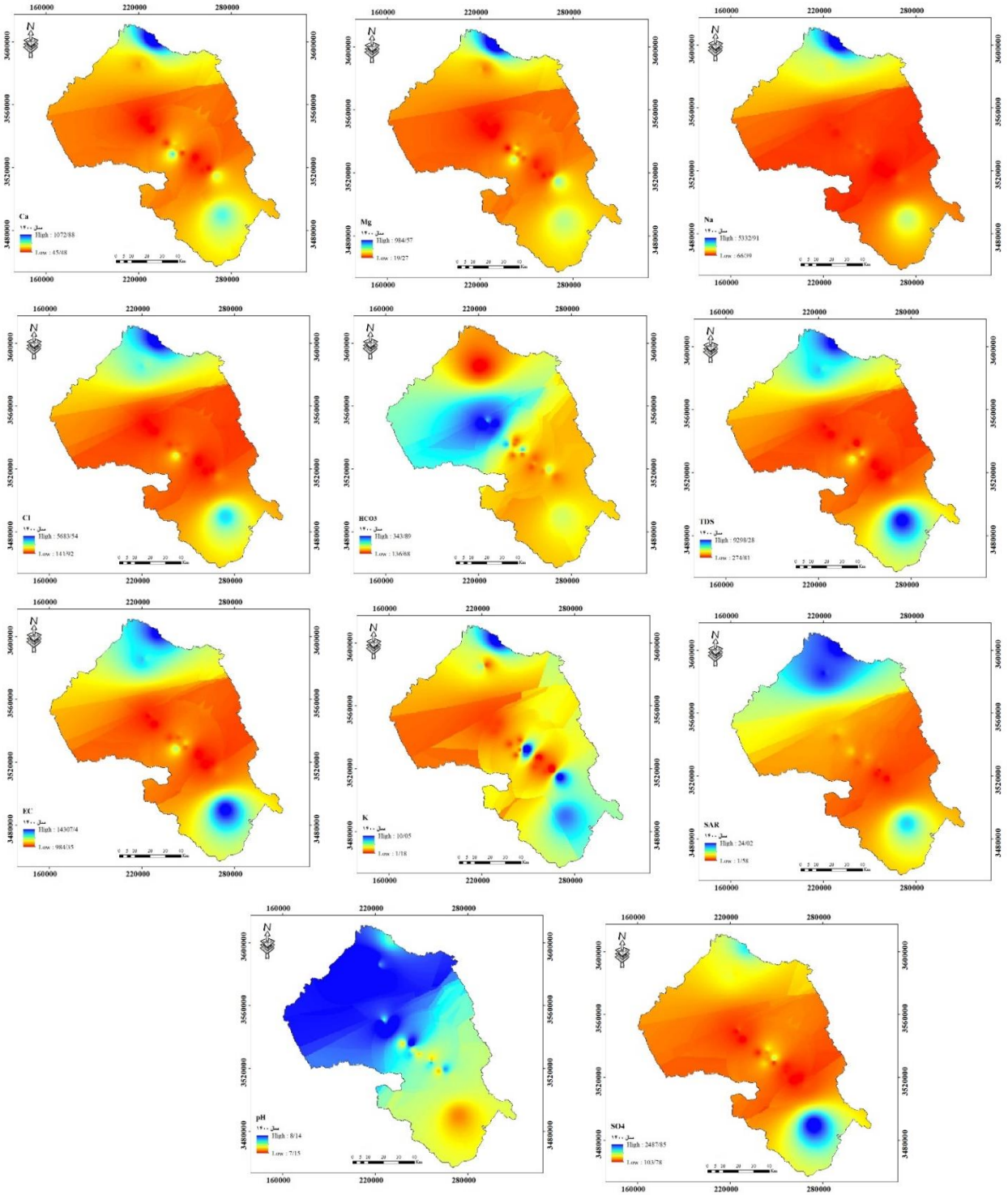
نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای مورد بررسی شامل غلظت کاتیون‌ها، سدیم، پتاسیم، منیزیم، کلسیم، آنیون‌ها، کلر، بی‌کربنات، سولفات، شوری و اسیدیته و مواد جامد محلول در سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ برای دشت یزد ـ اردکان به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. همانطور که نتایج پهنه‌بندی نشان می‌دهد غلظت کاتیون‌ها، آنیون‌ها و شوری در سال ۱۳۹۰ در شمال و بخشی از جنوب دشت بیشترین است و به سمت مرکز دشت کاهش یافته به طوری‌که کمترین مقادیر آن در شرق، غرب و مرکز دشت مشاهده می‌شود. به جز بی‌کربنات که بیشترین مقدار آن در شرق و مرکز دشت دیده می‌شود. بیشترین مقدار کلسیم ۴۷۸/۹۱، منیزیم ۲۸۳/۹۹، سدیم ۲۶۰۰/۳۳، پتاسیم ۱۰/۹۴، کلر ۳۸۲۳/۶۵، بی‌کربنات ۴۶۴/۸۲ و سولفات ۱۹۹۸/۳۴ میلی گرم بر لیتر، شوری ۱۳۳۱۷/۵ میکروموس بر سانتیمتر گزارش می‌شود. بیشترین مقادیر اسیدیته (۸/۰۵) و نسبت جذب سدیم (۲۹/۱۷) نیز در شمال دشت وجود دارد. با گذشت زمان ۱۰ ساله کیفیت آب زیرزمینی دشت یزد اردکان تغییرات محسوسی نشان می‌دهد؛ به طوری که نقشه‌های پهنه‌بندی غلظت عناصر شیمیایی در سال ۱۴۰۰ (شکل ۳) نسبت به سال ۱۳۹۰ تغییراتی را نشان می‌دهد. به این معنی که هم مقادیر حداکثر این پارامترها افزایش یافته است و هم به جز بخش‌های شمالی و بخشی از جنوب دشت، غلظت برخی عناصر در شرق و مرکز دشت نیز افزایش یافته است. به عبارت دیگر از نظر زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت رو به کاهش بوده است و هم از نظر مکانی مساحت‌های بیشتری از دشت با کاهش کیفیت آب زیرزمینی مواجه شده‌اند. بیشترین میزان کلسیم ۱۰۷۲/۸۸، منیزیم ۹۸۴/۵۷، سدیم ۵۳۳۲/۹۱، پتاسیم ۱۰/۰۵، کلر ۵۶۸۳/۵۴، بی‌کربنات ۳۴۳/۸۹ و سولفات ۲۴۸۷/۸۵ میلی گرم بر لیتر در سال ۱۴۰۰ مشاهده گردید و باعث شد حداکثر شوری آب زیرزمینی در این دشت به ۱۴۳۰۷/۴ میکروموس بر سانتیمتر برسد، به عبارت دیگر در بازهٔ ۱۰ ساله آب زیرزمینی دشت حدود ۷/۵ درصد شورتر شده است.

نتایج نشان می‌دهد که یون‌های مهم و تأثیرگذار بر شوری و کاهش کیفیت آب زیرزمینی مانند سدیم و کلر، کلسیم، منیزیم و سولفات تغییرات بیشتری در دهۀ مورد بررسی نشان داده‌اند. تحلیل ارائه شده در مورد کیفیت آب زیرزمینی این دشت، بر اساس نتایج مطالعات مختلف، نشان‌دهندۀ توزیع مکانی ناهمگن کیفیت آب است که عمدتاً تحت تأثیر عوامل زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و انسانی قرار دارد.



شکل ۲- پهنه‌بندی غلظت کاتیون‌ها، آنیون‌ها، شوری، مواد جامد محلول، pH و نسبت جذب سدیم در دشت یزد-اردکان در سال ۱۳۹۰

Fig.2. Zoning of the concentration of cations, anions, salinity, dissolved solids, pH and SAR in the Yazd-Ardakan plain in 2011



شکل ۳- پهنه‌بندی غلظت کاتیون‌ها، آنیون‌ها، شوری، مواد جامد محلول، pH و نسبت جذب سدیم در دشت یزد - اردکان در سال ۱۴۰۰

Fig. 3. Zoning of the concentration of cations, anions, salinity, dissolved solids, pH and SAR in the Yazd-Ardakan plain in 2021

تغییرات سطح آب زیرزمینی

سطح آب زیرزمینی در ۶۶ چاه پیزومتری واقع در دشت یزد - اردکان در دو سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ (شکل ۴) نشان دهندهٔ کاهش قابل توجه سطح آب زیرزمینی در طول یک دهه است. نوسانات مشابه در هر دو خط (پیک‌ها و دره‌ها در موقعیت‌های مشابه) نشان‌دهندهٔ تغییرات مکانی طبیعی در دشت است، مانند تفاوت‌های زمین‌شناسی، نرخ پمپاژ محلی یا نفوذپذیری خاک. با این حال، جابه‌جائی دو منحنی، تخلیه سیستماتیک منابع آب زیرزمینی را تأیید می‌کند. این نمودار شواهدی بصری از روند کاهشی طولانی مدت در منطقه، ارائه می‌دهد، که با داده‌های زمانی - مکانی از مطالعات محلی همخوانی دارد. برای مثال، تحقیقات نشان می‌دهد که دشت یزد - اردکان در سال‌های اخیر کاهش قابل توجهی در سطح آب تجربه کرده است، که عمدتاً به دلیل خشکسالی و برداشت بی‌رویه آب برای کشاورزی و مصارف شهری است (Khosravi et al., 2018; Khajavi, Soltani-Gerdefaramarzi & Gheysouri, 2025). این کاهش معمولاً نتیجه ترکیبی از عوامل طبیعی و انسانی است. کاهش سطح آب زیرزمینی نه تنها کمیت را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه می‌تواند کیفیت آب زیرزمینی را نیز کاهش دهد. این تأثیرات اغلب به دلیل دسترسی به لایه‌های عمیق‌تر آبخوان، که معمولاً دارای غلظت بالاتر آلاینده‌ها هستند، یا کاهش تغذیه آبخوان که منجر به غلظت مواد محلول می‌شود، رخ می‌دهد.

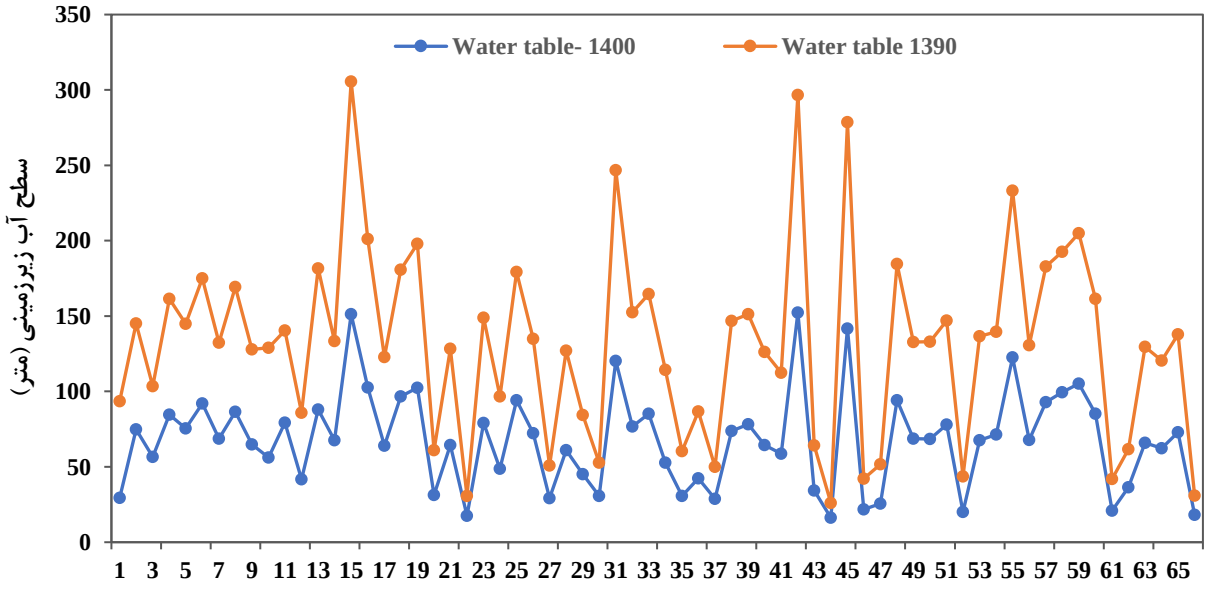
نتایج شاخص کیفیت آب زیرزمینی

مقادیر شاخص PIG در دو سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ در ۲۷ چاه مورد بررسی در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق با این نتایج، تقریباً در ۵۸ درصد چاه‌های مورد بررسی در این دشت، مقدار شاخص PIG افزایش یافته است. بیشترین میزان افزایش شاخص در پایین‌ترین نقطهٔ دشت از نظر ارتفاعی یعنی منطقه چاه افضل اردکان و دم کفتار است. شاخص PIG برای چاه‌های واقع در شمال دشت یزد - اردکان شامل چاه عیش آباد، قاسم آباد اردکان، نظام آباد، ترک آباد، چاه افضل، دم کفتار و شیخ ابوالقاسم واقع در میبد) همچنین چاه خیرآباد شرکا در جنوب دشت نیز در هر دو سال مورد بررسی دارای شاخص PIG بالا و کیفیت پایین آب زیرزمینی می‌باشد.

نقشهٔ پهنه‌بندی شاخص PIG نیز در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به این شکل و طبق طبقه‌بندی ارائه شده توسط سوبا راو (Subba Rao, 2012) ، در سال ۱۳۹۰ مناطق شرقی، غربی و مرکز دشت دارای آب زیرزمینی با آلودگی کم و ناچیز و با کیفیت بوده است که حدوداً ۵۱/۴۳ درصد از مساحت دشت را به خود اختصاص داده است. مناطق شمالی و جنوبی دشت با مساحت ۲۸/۱۶ درصد دارای آلودگی بسیار زیاد می‌باشند. ۱۰/۸۳ درصد و ۲۸/۱۶ درصد از مساحت دشت نیز به ترتیب دارای آلودگی متوسط و زیاد می‌باشند. با گذشت زمان در دورهٔ ۱۰ ساله نتایج شاخص PIG هم از نظر زمانی و هم از نظر مکانی در سال ۱۴۰۰ متفاوت از سال ۱۳۹۰ است. به عبارت دیگر مساحت بیشتری از دشت جزء طبقه آلودگی خیلی زیاد قرار گرفته است و از مساحت منطقه با آلودگی ناچیز کاسته شده است. نتایج پهنه‌بندی شاخص PIG در سال ۱۴۰۰، حاکی از این است که ۲۴/۸۰ درصد دارای آلودگی کم و ناچیز، ۲۳/۹۴ درصد آلودگی متوسط، ۹/۱۲ درصد آلودگی زیاد و ۴۲/۰۴ درصد دارای آلودگی بسیار زیاد است. لازم به ذکر است که بیشترین مساحت دشت با آلودگی خیلی زیاد در قسمت شمال دشت قرار گرفته است.

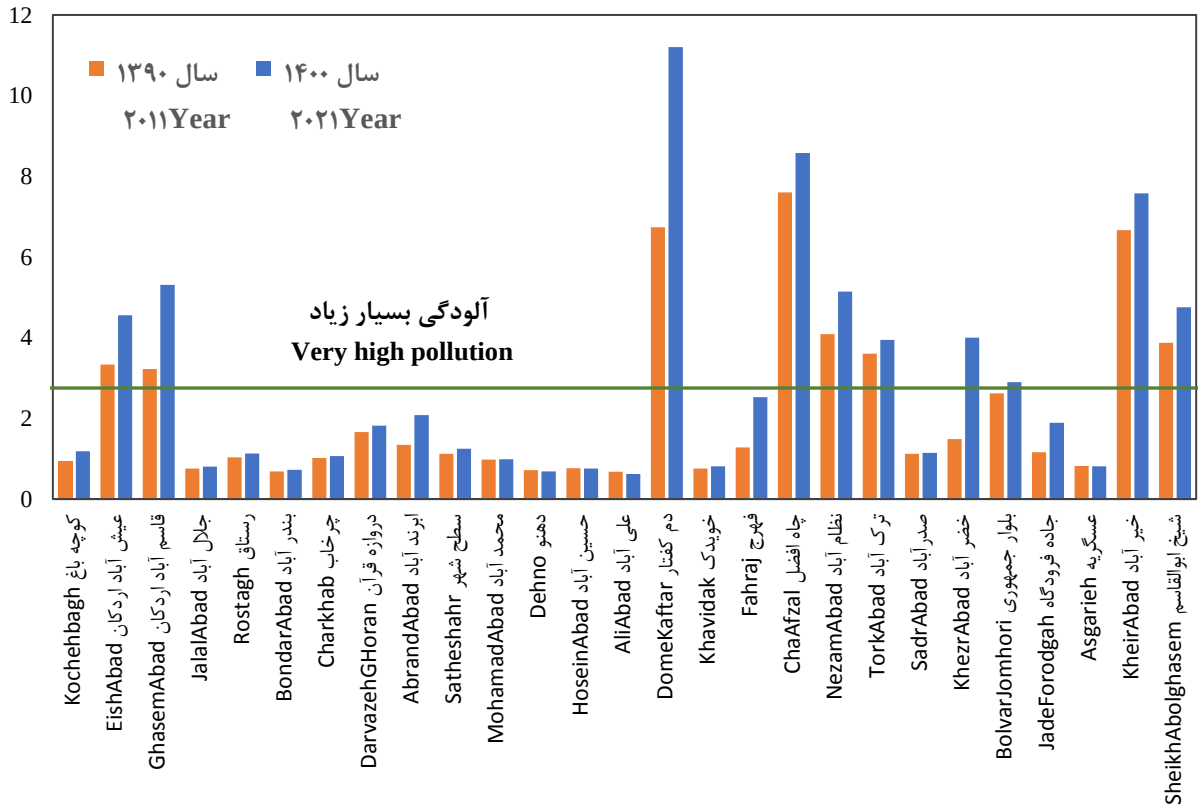
خروجی آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان عمدتاً در بخش شمالی آن قرار دارد، جایی که ارتفاع نسبت به سطح دریا کمترین مقدار را دارد (افت سطح آب از بیش از ۱۰۰ متر در جنوب به کمتر از ۱۰ متر در شمال). این موقعیت توپوگرافیکی باعث می‌شود شمال دشت به عنوان محل تجمع نهایی جریان آب زیرزمینی عمل کند، که در نتیجه تمام آلاینده‌ها، نمک‌ها و مواد محلول از بخش‌های بالادست (جنوب و مرکز) به این منطقه منتقل و انباشته شوند. این پدیده، که به عنوان «جمع شدن آلاینده‌ها در محل خروجی» شناخته می‌شود، اصلی‌ترین دلیل کیفیت پایین آب در شمال منطقهٔ مطالعاتی است. همچنین جهت جریان آب زیرزمینی از جنوب شرقی به شمال غربی است و شیب ملایم دشت (از جنوب به شمال) باعث می‌شود آلاینده‌ها در شمال رسوب کنند.

عوامل طبیعی مانند تبخیر بالا در منطقه خشک دشت یزد - اردکان، نفوذ آب شور از نواحی شوره‌زار و تپه‌ماهورهای شمالی، و کاهش نفوذپذیری لایه‌های رسوبی در شمال، شوری را تشدید می‌کند. مقادیر TDS در شمال اغلب بیش از ۴۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و می‌تواند نشان‌دهنده نفوذ آلاینده‌های انسانی یا طبیعی باشد (Heidari, Ekrami & Nasabpour, 2015). از طرف دیگر گسترش اراضی کشاورزی و شهری در مرکز و شمال منجر به استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی و نفوذ فاضلاب شده، که آلاینده‌ها را افزایش می‌دهد. تغییرات کاربری اراضی از دهه‌های گذشته، مانند تبدیل مراتع به کشاورزی، کیفیت را در شمال بدتر کرده است (Khajavi et al., 2025). منطقهٔ جنوب دشت یزد - اردکان از نظر زمین شناسی دارای سازندهای نمک‌دار نئوژن و رسوبات تبخیری-تخریبی است که باعث شده کیفیت آب زیرزمینی در این قسمت پایین بوده و شوری بالای آب زیرزمینی در این ناحیه گزارش شود (Mehrshahi & Mehrnahad, 2006). کیفیت آب زیرزمینی در این دشت بر اساس شاخص‌هایی مانند شاخص کیفیت آب زیرزمینی، هدایت الکتریکی، کل مواد جامد محلول، نسبت جذب سدیم، و غلظت یون‌هایی مانند سدیم، کلر، کلسیم و منیزیم ارزیابی می‌شود. مطالعات نشان می‌دهند که کیفیت کلی آب در دشت یزد - اردکان متوسط تا نامناسب است و روند زمانی آن نزولی بوده است. برای مثال، میانگین GQI از حدود ۷۷/۶۹ در سال ۱۳۸۲ به ۷۲/۲۶ در سال ۱۳۹۰ کاهش یافته، که این کاهش عمدتاً به دلیل افزایش شوری و آلاینده‌ها است. همچنین، افت سطح آب زیرزمینی در چهار دهه اخیر حدود ۰/۵ متر در سال بوده و تخلیه سالانه منابع آب حدود ۵۶۴ میلیون مترمکعب است (۸۲٪ برای کشاورزی)، که این برداشت بیش از حد منجر به نفوذ آب شور و کاهش کیفیت شده است (Khosravi et al., 2018).



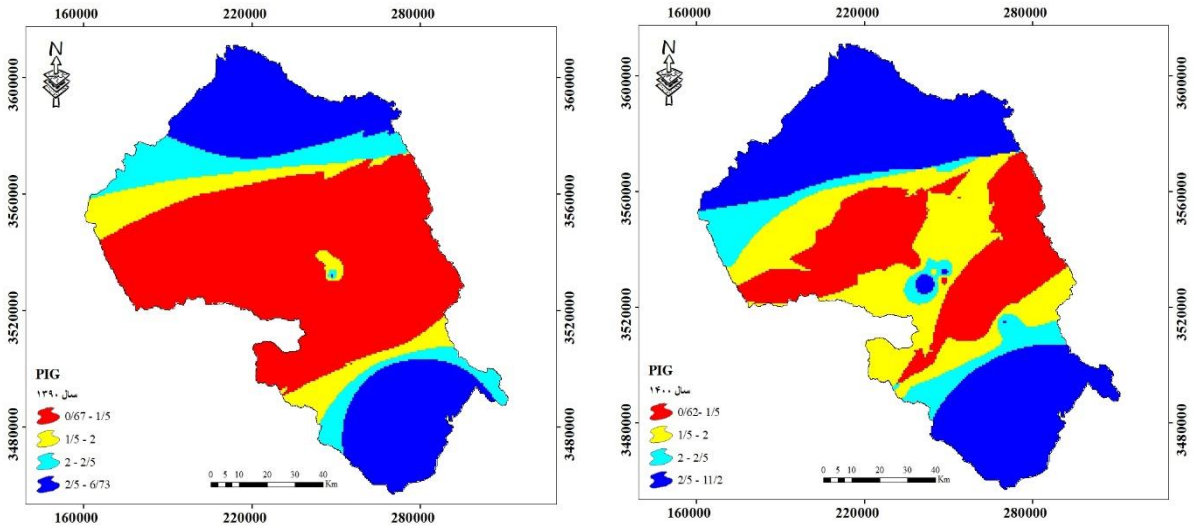
شکل ۴- سطح آب زیرزمینی در ۶۶ چاه پیزومتری در دشت یزد - اردکان در دو سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰

Fig. 4. Groundwater surface in 66 piezometric wells in the Yazd-Ardakan plain in 2011 and 2021



شکل ۵- مقادیر شاخص PIG در دو سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ در ۲۷ چاه مورد بررسی

Fig. 5. PIG index values for 2011 and 2021 years in study wells



شکل ۶- پهنه‌بندی شاخص PIG در سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ در دشت یزد اردکان

Fig. 6. Zoning of the PIG index for 2011 and 2021 in the Yazd-Ardakan plain

نتیجه‌گیری

دشت یزد - اردکان یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آب زیرزمینی در استان یزد ایران است که با مساحتی حدود ۱۱۷۷۱ کیلومتر مربع، بخش عمده‌ای از جمعیت استان را در خود جای داده و نقش حیاتی در تأمین آب برای مصارف کشاورزی، صنعتی و شرب ایفا می‌کند. این دشت در یک منطقهٔ خشک و نیمه‌خشک واقع شده و با چالش‌های جدی مانند برداشت بی‌رویه، افت سطح آب و کاهش کیفیت آب زیرزمینی روبه‌رو است. تحلیل ارائه شده در مورد کیفیت آب زیرزمینی این دشت، بر اساس نتایج مطالعات مختلف، نشان‌دهندهٔ توزیع مکانی ناهمگن کیفیت آب است که عمدتاً تحت تأثیر عوامل زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی مانند جهت جریان آب زیرزمینی از جنوب شرقی به شمال غربی و شیب ملایم دشت و عوامل انسانی مانند گسترش اراضی کشاورزی و شهری در مرکز و شمال دشت منجر به استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی و نفوذ فاضلاب شده، که غلظت آلاینده‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین تغییرات کاربری اراضی از دهه‌های گذشته، مانند تبدیل مراتع به کشاورزی، کیفیت آب زیرزمینی را کاهش داده است. در این پژوهش، از شاخص آلودگی آب زیرزمینی (PIG) مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شد، که داده‌های کیفیت آب (کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کلر، بی‌کربنات، سولفات، مواد جامد محلول، اسیدیته و شوری) را به شکل قابل فهم بیان می‌دارد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که که منابع آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان در قسمت غرب و شرق دارای بهترین کیفیت و در شمال دشت و بخشی از جنوب دارای کمترین کیفیت است. خروجی آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان در شمال قرار گرفته که دارای کمترین ارتفاع نسبت به سطح دریاست و کیفیت پایین آب زیرزمینی این منطقه به دلیل جمع شدن تمام آلاینده‌ها در این منطقه است. اما ناحیه غرب دشت یزد - اردکان به دلیل محل ورودی آب‌های حوضه تفت - نصرآباد به دشت دارای بهترین کیفیت است (Khosravi et al., 2018). لازم به ذکر است که کیفیت آب زیرزمینی حوضه تفت - نصرآباد به علت بارش مناسب و شرایط محیطی مناسب از کیفیت بالائی برخوردار است. نتایج بررسی روند زمانی تغییرات شاخص PIG نشان داد که این شاخص با گذشت زمان در حال افزایش است، و این افزایش در منطقهٔ شمال دشت بیشتر مشهود است. به طوری که چاه قرار گرفته در دم کفتار در منطقه شمال دشت افزایش قابل توجهی داشته است (۶۶ درصد) و شاخص PIG از ۶/۷۳ به ۱۱/۲۰ رسیده است. یکی از دلایل آلودگی بیشتر شمال دشت نسبت به مرکز و غرب و شرق، موقعیت جغرافیایی و ارتفاعی این قسمت است. خروجی آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان در شمال قرار گرفته که دارای کمترین ارتفاع نسبت به سطح دریاست و کیفیت پایین آب زیرزمینی این منطقه به دلیل جمع شدن تمام آلاینده‌ها در این منطقه است. طبق شاخص PIG در سال ۱۳۹۰، ۵۱/۴۳ درصد از کل مساحت دشت دارای آلودگی کم و ناچیز، ۹/۵۸ درصد از مناطق دارای آلودگی متوسط، ۱۰/۸۳ درصد دشت دارای آلودگی زیاد و ۲۸/۱۶ درصد دارای آلودگی بسیار زیاد بوده است و با گذشت یک دهه کیفیت آب زیرزمینی کاهش یافته است؛ به طوری‌که ۲۴/۸۰ درصد دارای آلودگی کم و ناچیز، ۲۳/۹۴ درصد آلودگی متوسط، ۹/۱۲ درصد آلودگی زیاد و ۴۲/۰۴ درصد دارای آلودگی بسیار زیاد است. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که با گذشت زمان کیفیت آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان از سمت شمال و جنوب به سمت مرکز دشت کاسته شده است. منطقهٔ جنوبی دشت یزد - اردکان از نظر زمین‌شناسی غنی از سازنده‌های نمک‌دار دوران نئوژن و رسوبات تبخیری - تخریبی است. این سازنده‌ها شامل لایه‌های گچی، نمکی و رسوبی تبخیری هستند که در اثر فرآیندهای تبخیر در محیط‌های خشک تشکیل شده‌اند و باعث حل شدن نمک‌ها در آب زیرزمینی می‌شوند. نتیجه این ساختار زمین‌شناسی، شوری بالای آب (EC بالا و SAR نامناسب) و کیفیت پایین برای مصارف کشاورزی و شرب است. خسروی و همکاران (Khosravi et al., 2018) با استفاده از شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) نتایج مشابهی را گزارش کردند و آنها نقش کاربری اراضی و فعالیت‌های انسانی را در کاهش کیفیت آب زیرمینی دشت یزد - اردکان واضح گزارش کردند. آنها نشان دادند که قسمت غرب و شمال دشت یزد اردکان به ترتیب بهترین و بدترین کیفیت آب زیرزمینی را داراست و با گذشت زمان مساحت بیشتری از دشت با کاهش کیفیت آب زیرزمینی مواجه شده است. هم چنین گسترش دو ناحیه با کاهش کیفیت آب زیرزمینی را در مرکز و جنوب دشت یزد اردکان در سال ۱۳۹۰ گزارش کردند.

ارشاد حسینی و همکاران (Ershad-Hosseini et al., 2021) و خواجوی و همکاران (Khajavi et al., 2025) نیز نشان دادند که غلظت پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان روند افزایشی داشته و منابع آب زیرزمینی در این دشت به سمت کاهش کیفیت گرایش پیدا کرده اند. آنها نتیجه‌گیری کردند که این کاهش کیفیت به کاهش سطح ایستابی ناشی از تغییرات کاربری و پیرو آن برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی و همچنین کاهش میزان بارندگی در بازۀ ۲۱ساله و وقوع پی درپی پدیدۀ خشکسالی در دهه‌های اخیر برمی‌گردد. روند افزایشی غلظت پارامترهای مؤثر بر کیفیت منابع آب زیرزمینی در این دشت با نتایج بررسی روند غلظت پارامترهای تأثیرگذار بر شرایط کیفی منابع آب زیرزمینی حاصل از پژوهش‌های صاحب جلال و همکاران (Sahebjalal, Dehghany & Tabatabaeezade, 2013) ؛ قلی‌زاده و همکاران (Gholizadeh et al., 2017)؛ رفیع شریف آباد و همکاران (Rafi Sharifabad et al., 2017)؛ خسروی و همکاران (Khosravi et al., 2018) ؛ ارشاد حسینی و همکاران (Ershad-Hosseini et al., 2021)؛ ایزدی و همکاران (Izadi et al., 2022a ,b)؛ محمودی و عرفانی (Mahmodi & Erfanian, 2022) و نیز نادری اشکفتکی و همکاران (Naderi Eshkaftaki, Mirabbasi & Nasr Esfahani, 2023) مطابقت داشت. بر اساس روند نزولی بارش در بازۀ زمانی منتهی به دهۀ ۱۳۹۰ و کاهش سطح آب منابع آب زیرزمینی در دشت یزد - اردکان (Omidvar, Zareh & Ebrahimi, 2016; Ershad-Hosseini et al., 2021; Khajavi et al., 2025) می‌توان بیان داشت که برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی و پیرو آن کاهش سطح منابع آب زیرزمینی و همچنین کاهش میزان بارندگی، وقوع پدیدۀ خشکسالی و در نتیجه افت سطح آب زیرزمینی افزایش غلظت پارامترهای کیفی و کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی محدودۀ مطالعاتی را به دنبال داشته است. از سوی دیگر با توجه به نتایج به دست آمده معلوم شد کیفیت آب زیرزمینی به ویژه در نواحی شمالی و جنوبی دشت یزد - اردکان، وضعیت نامطلوبتری نسبت به سایر مناطق محدودۀ مطالعاتی دارد و نیازمند اقدامات مدیریتی و حفاظتی ویژه‌ای در زمینۀ بهبود کیفیت و کمیت منابع آب زیرزمینی می‌باشد. برای مقابله با این مشکلات، مدیریت یکپارچۀ منابع آب ضروری است. کاهش برداشت، وضع قوانین سخت‌گیرانه برای جلوگیری از حفر چاه‌های غیرمجاز و کاهش برداشت بیش از حد، افزایش ورودی آب به آبخوان از طریق روش‌های طبیعی یا مصنوعی، استفاده از روش‌های آبیاری کارآمد، بازچرخانی و تصفیه آب، استفاده از فناوری‌های نوین در بخش کشاورزی و صنعت، پایش مداوم با ابزارهایی مانند GIS و مدل‌های یادگیری ماشین جهت پیش‌بینی کیفیت آب، همچنین، انتقال آب از حوضه‌های مجاور و حفاظت از منابع آب ورودی‌های غربی آبخوان، می‌تواند کمک کند.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از شرکت آب منطقه‌ای یزد برای در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز این پژوهش تشکر و قدردانی می‌کنند.

References

Adimalla, N. (2021). Application of the entropy weighted water quality index (EWQI) and the pollution index of groundwater (PIG) to assess groundwater quality for drinking purposes: a case study in a rural area of Telangana State, India. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, *80*(1), 31-40. https://doi.org/10.1007/s00244-020-00800-4

Akakuru, O. C., Eze, C. U., Okeke, O. C., Opara, A. I., Usman, A. O., Iheme, O., ... & Iwuoha, P. O. (2022). Hydrogeochemical evolution, water quality indices, irrigation suitability and pollution index of groundwater (PIG) around Eastern Niger Delta, Nigeria. *International Journal of Energy and Water Resources*, *6*(3), 389-411. https://doi.org/10.1007/s42108-021-00162-0

Djebassi, T., Abdeslam, I., & Fehdi, C. (2021). Groundwater quality assessment, using pollution index of groundwater (PIG) from a semi-arid basin, Tebessa region (north-east of Algeria). *Journal of Materials and Environmental Science*, *2508*(8), 1046-1056. http://www.jmaterenvironsci.com/Journal/vol12-8.html

Ehteram, M., & Soltani-Gerdefaramarzi, S. (2025). Advanced hybrid frameworks for water quality index prediction. *Ain Shams Engineering Journal*, *16*(8), 103478. https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103478

Ershad-Hosseini, M., Keshtkar, A., Hosseini, S., & Afzali, A. (2021). Analysis of temporal trend of groundwater quality using nonparametric Mann-Kendall and Sen's methods (Case study: Yazd-Ardakan Plain). *Geography and Environmental Planning*, *32*(4), 87-106. [In Persian] https://doi.org/10.22108/gep.2021.127620.1404

Gholizadeh, A., Mokhtari, M., Naimi, N., Shiravand, B., Ehrampoush, M. H., Miri, M., & Ebrahimi, A. (2017). Assessment of corrosion and scaling potential in groundwater resources; a case study of Yazd-Ardakan Plain, Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, *5*, 59-65. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.04.002

Heidari, E., Ekrami, M., & Nasabpour, S. (2015). Temporal and Spatial Study Groundwater Quality Using Geostatistical (Casestudy: Yazd – Ardakan Plain). *Desert Ecosystem Engineering Journal*, *4*(6), 63-70. [In Persian] https://deej.kashanu.ac.ir/jufile?ar_sfile=1064228

Izadi, N., KhasheiSiuki, A., Pourreza Bilondi, M., & Hashemi, S. R. (2022b). Presenting a New Index of Pollution and Ecology Risk of Groundwater (PERG). *Environment and Water Engineering*, *8*(2), 278-290. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jewe.2021.290702.1581

Izadi, N., Khashei Siuki, A., Pourreza Bilondi, M., & Hashemi, R. (2022a). Evaluation of chemical pollution of Birjand plain aquifer using groundwater pollution index (PIG). *Journal of Aquifer and Qanat*, *2*(2), 24-32. [In Persian] https://jaaq.birjand.ac.ir/article_2194.html

Khajavi, Z., Soltani-Gerdefaramarzi, S., & Gheysouri, M. (2025). The impact of land use on the quality and quantity of groundwater in the Yazd-Ardakan plain. *Extension and Development of Watershed Management*, *13*(50), 52-60. [In Persian] https://www.wmji.ir/article_729965.html

Khosravi, H., Haydari Alamdarloo, E., & Nasabpour, S. (2018). Investigation of Spatial-Temporal changes of Yazd-Ardakan Plain Groundwater Quality Using GQI. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, *26*(104), 35-44. [In Persian] https://doi.org/10.22131/sepehr.2018.30516

Mahmodi, M., & Erfanian, M. (2022). Water Quality Assessment of Surface and Ground Water Resources in Naghadeh- Oshnavieh Plain. *Environmental Researches*, *13*(25), 33-50. [In Persian] https://www.iraneiap.ir/article_158574.html

Mehrshahi, D., & Mehrnahad, H. (2006). Morphotectonic forms resulting from the operation of the North Yazd fault. *Geography*, *4*(11), 21-31. [In Persian] https://mag.iga.ir/article_704313.html?lang=en

Naderi Eshkaftaki, M., Mirabbasi, R., & Nasr Esfahani, M. A. (2023). Investigation of Temporal and Spatial Variations of Groundwater Quality in Sefiddasht Plain and Suitability Evaluation for Agricultural Use. *Hydrogeology*, *7*(2), 91-108. [In Persian] http://dx.doi.org/10.61186/jehe.10.3.221

Omidvar, K., Zareh, M., & Ebrahimi, R. (2016). The Effect of Recent Droughts on Groundwater Resources in Yazd-Ardakan Plain. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *10*(5), 622-635. [In Persian] https://idj.iaid.ir/article_55428_en.html

Prasad, M., Sunitha, V., Balaji, E., Reddy, B. M., Sudharshan Reddy, Y., & Kumar, B. P. (2025). Application of Water Quality Index, Hierarchical Cluster Analysis, Pollution Index of Groundwater and Geospatial Technologies in Evaluating the Water Quality: A Study from Mangampeta Barytes Mine Area, South India. In *Groundwater Resource Management Planning Strategies: A Geospatial Approach: Volume 1* (pp. 745-774). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88870-0_29

Rafi Sharifabad, J., Nohegar, A., Zehtabian, G., & Gholami, H. (2017). Tracking temporal and spatial changes in underground water quality for potable and agricultural purpose (Case study: Yazd-Ardakan Plain). *Desert Management*, *5*(9),107-119. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jdmal.2017.27853

Rastgoo, M., Nasiri Saleh, F., & Khashei Siuki, A. (2023). Evaluation of groundwater quality for drinking purpose in birjand aquifer using PIG index and modified LPIG index based on AHP method. *New Research in Sustainable Water Engineering*, *1*(2), 57-73. [In Persian] https://doi.org/10.22103/nrswe.2023.20384.1016

Sahebjalal, E., Dehghany, F., & Tabatabaeezade, M. S. (2013). Investigating Spatio-Temporal Variations of Groundwater Quality Using Kriging Method. *Journal of Water and Soil Science*, *17*(65), 51-61. [In Persian] http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-1688-fa.html

Sanad, H., Mouhir, L., Zouahri, A., Moussadek, R., El Azhari, H., Yachou, H., ... & Dakak, H. (2024). Assessment of groundwater quality using the pollution index of groundwater (PIG), nitrate pollution index (NPI), water quality index (WQI), multivariate statistical analysis (MSA), and GIS approaches: A case study of the Mnasra Region, Gharb Plain, Morocco. *Water*, *16*(9), 1263. https://doi.org/10.3390/w16091263

Sarvi Sadrabad, H., & Zare Chahouki, A. (2022). Study of the Efficiency of Groundwater Quality Index to Evaluate the Long-term Effects of Inter-Basin Water Transfer Using Non-Parametric Methods and GIS (Case Study Yazd-Ardakan Aquifer). *Water and Soil*, *35*(6), 804-791. [In Persian] https://doi.org/10.22067/jsw.2021.71571.1073

Shube, H., Karuppannan, S., Haji, M., Paneerselvam, B., Kawo, N., Mechal, A., & Fekadu, A. (2024). Appraising groundwater quality and probabilistic human health risks from fluoride-enriched groundwater using the pollution index of groundwater (PIG) and GIS: a case study of adama town and its vicinities in the central main Ethiopian rift valley. *RSC Advances*, *14*(41), 30272-30285. https://doi.org/10.1039/D4RA02890B

Subba Rao, N. (2012). Evaluation of groundwater quality using pollution index of groundwater (PIG) in Visakhapatnam, India: A GIS approach. *Journal of Environmental Analytical Chemistry*, *2*(5), 1–8. https://doi.org/10.1002/hyp.8456

Sunitha, V., Madhavi, P., & Srinivasa Rao, V. (2021). Groundwater quality evaluation for drinking purposes using PIG index and GIS: A case study from Andhra Pradesh, India. *Environmental Earth Sciences*, *80*(4), 189–197. https://doi.org/10.1007/s12665-021-09461-4

Verma, A., & Singh, N. B. (2021). Evaluation of groundwater quality using pollution index of groundwater (PIG) and non-carcinogenic health risk assessment in part of the Gangetic Basin. *Acta Geochimica*, *40*(3), 419-440. https://doi.org/10.1007/s11631-020-00446-y

Yazici-Karabulut, B., Kocer, Y., & Yesilnacar, M. I. (2024). Bottled water quality assessment through entropy-weighted water quality index (EWQI) and pollution index of groundwater (PIG): A case study in a fast-growing metropolitan area in Türkiye. *International Journal of Environmental Health Research*, *34*(1), 61-72. https://doi.org/10.1080/09603123.2022.2130880

Vol. 15, No. 1, Spring 2026, p. 132-152 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.95012.1604 OPEN ACCESS

Assessment of Reanalysis Derived Snow Depth Uncertainty in Northwestern Iran Using ERA5-Land and MERRA-2

Bromand Salahi[1]*, **Ali Shahi**[1]

[1] Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 19 July 2025

Revised: 16 September 2025

Accepted: 20 September 2025

Available Online:

26 September 2025

Keywords:

Snow Depth

Climatic Uncertainty

MERRA-2

ERA5-Land

Northwestern Iran

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the accuracy of snow depth estimation derived from two reanalysis datasets, ERA5-Land and MERRA-2, across northwestern Iran, using data from ten selected synoptic meteorological stations over a 20-year period (2004–2023). Ground-based observational data were obtained from the Iranian Meteorological Organization, while reanalysis data were acquired from the NASA repository for MERRA-2 and the Copernicus Climate Data Store for ERA5-Land. To downscale the outputs of both reanalysis datasets and reduce systematic bias, the Quantile Mapping (QM) method was employed. The performance of ERA5-Land and MERRA-2 was statistically evaluated by comparing their estimated snow depth values with in situ observations from the synoptic stations on a monthly time scale. Four statistical indicators Kling Gupta Efficiency (KGE), Taylor diagram metrics, Pearson correlation coefficient, and Root Mean Square Error (RMSE) were calculated using the R statistical environment. The results demonstrated that the Quantile Mapping bias-correction technique provides reliable adjustment for snow-related parameters and can effectively improve reanalysis accuracy. Overall, the ERA5-Land dataset showed a higher capability in detecting wintertime snow depth variations across northwestern Iran compared to MERRA-2. The best performance of ERA5-Land was observed at the Mahabad, Khoy, Tabriz, Ahar, Urmia, and Maragheh stations. Furthermore, the analysis revealed a spatial pattern of uncertainty, with an increase in ERA5-Land snow depth uncertainty from the western toward the eastern parts of northwestern Iran. These findings indicate that ERA5-Land provides robust and reliable estimates of snow depth in winter conditions, particularly over the complex topography of northwestern Iran, although its accuracy decreases slightly eastward due to localized climatic and terrain influences.

* Corresponding author: Bromand Salahi E-mail address: salahi@uma.ac.ir

How to cite this article: Salahi, B., & Shahi, A. (2026). Assessment of Reanalysis Derived Snow Depth Uncertainty in Northwestern Iran Using ERA5-Land and MERRA-2. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 15*(1), 132-152. https://doi.org/10.22067/GEOEH.2025.95012.1604

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Snow is an important phenomenon in mountainous areas and at high latitudes. Since snow causes transportation and agricultural problems due to temperature drops, it requires careful investigation. Snow evaluation without reliable data cannot produce effective and meaningful results. Due to the constraints of mountainous regions in the construction and maintenance of ground stations and the limited number of synoptic stations, data coverage is often insufficient. One suitable alternative is the use of reanalysis datasets, which can provide valuable information for researchers if they have appropriate spatial resolution and are compatible with the study area. Therefore, the accuracy and effectiveness of these datasets must be evaluated prior to their application.

Material and Methods

After obtaining monthly data from both reanalysis datasets, the snow depth parameter was converted from meters to centimeters to ensure consistency. The accuracy of the datasets was initially evaluated using a Taylor diagram and compared with observational data. For this purpose, 30% of the study stations (three stations) were selected based on their spatial distribution, climatic variability, distance between stations (km), and elevation differences. Due to the weak performance of raw snow depth data from both datasets in the Taylor diagram, the outputs of the two reanalysis datasets were downscaled using the Quantile Mapping method. In the next step, the downscaled results for the three selected stations were compared with the raw snow depth values for the same stations. The calculations indicated that the downscaled results performed better; therefore, subsequent analyses were conducted using downscaled data for all 10 stations. Considering the geographical location and mountainous topography of the study area, as well as favorable conditions for snowfall during winter, snow depth analyses were carried out for December, January, and February. Statistical indices including the Pearson correlation coefficient, Root Mean Square Error (RMSE), and Kling Gupta Efficiency (KGE) were calculated using the R software to evaluate the seasonal and spatial variability of snow depth based on ERA5-Land and MERRA-2 reanalysis datasets.
For each station, the Percentage Bias Index (PBIAS) was calculated separately for the outputs of the two reanalysis datasets for each winter month, and the difference between the two datasets was averaged for each station. The resulting bias differences were zoned and mapped in a GIS environment for each three-month period. Finally, to provide a clear visual comparison of snow depth estimates from the two reanalysis datasets across the 10 stations in northwestern Iran, box plots were generated using R software.

Results and Discussion

According to the Taylor diagram results, downscaling of snow depth data from both reanalysis datasets is necessary before application. In this study, the ERA5-Land reanalysis dataset performed better than MERRA-2 in both spatial (station-based) and temporal (seasonal) analyses. Based on the Taylor diagram, the downscaled outputs from both datasets were used for further snow depth evaluation.

Bar graphs were produced for each synoptic station to represent winter snow depth over the 20-year study period. Among the 10 synoptic stations, Tabriz, Khalkhal, Meshkin Shahr and Urmia stations representing different elevations, geographical locations, and climatic conditions were selected for detailed analysis of the winter season.

In January, the correlation coefficient, RMSE and KGE values indicated that snow depth estimates from the ERA5-Land reanalysis dataset were more accurate than those from MERRA-2. Compared with MERRA-2, ERA5-Land exhibited lower RMSE values and higher correlation and KGE values. The highest accuracy of the ERA5-Land dataset was observed at the Tabriz synoptic station. In December, the best performance of ERA5-Land was recorded at the Urmia station, with a KGE value of 0.9.

The seasonal spatial distribution based on bias differences between the two datasets showed that the maximum spatial differences in snow depth occurred in January at the Tabriz and Maragheh stations (central part of the study area) and in February and December at the Ahar station (northern part of the study area).

Conclusion

The results showed that the raw outputs of ERA5-Land and MERRA-2 are not suitable for direct snow depth estimation in northwestern Iran, making downscaling unavoidable prior to application. The findings confirmed the reliability of the Quantile Mapping (QM) bias-correction method for snow-related variables. Overall, ERA5-Land demonstrated a higher capability in detecting winter snow depth compared with MERRA-2, which showed limited reliability except at a few stations and months; therefore, caution is required when using MERRA-2 data in the study area. ERA5-Land exhibited its best performance at the Mahabad, Khoy, Ahar, Urmia and Maragheh stations, with KGE values close to unity, whereas the weakest performance of both datasets occurred at the Sarab station. Temporally, ERA5-Land performed best in December, while the poorest performance was observed for MERRA-2 in February. The maximum bias difference between the two reanalysis datasets over the 20-year period reached 542 cm in December, with the largest spatial bias differences occurring at the Ahar station (December and February) and at the Tabriz and Maragheh stations (January). The minimum spatial bias difference was detected at the Ardabil station in January.

In addition, the uncertainty of ERA5-Land snow depth estimates increased from west to east across northwestern Iran. The results are largely consistent with previous studies reporting the superior performance of ERA5 over MERRA-2 in mountainous regions, while partially differing from studies suggesting systematic underestimation or latitude-dependent uncertainty patterns. Overall, this study provides a robust seasonal-scale assessment of reanalysis-based snow depth over a long-term period (2004–2023) using a multi-metric evaluation framework.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۱۵۲-۱۳۲

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.95012.1604 دسترسی آزاد

ارزیابی عدم قطعیت عمق برف بازتحلیل شده در شمال غرب ایران با استفاده از ERA5-Land و MERRA-2

برومند صلاحی[1*]، علی شاهی[1]

[1] گروه جغرافیای طبیعی، دانشکدهٔ علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹

کلمات کلیدی:

عمق برف

عدم قطعیت اقلیمی

MERRA-2

ERA5-Land

شمال‌غرب ایران

چکیده

این مطالعه با هدف ارزیابی دقت تخمین عمق برف توسط دو پایگاه بازتحلیل ERA5-Land و MERRA-2 در شمال‌غرب ایران (۱۰ ایستگاه همدیدی منتخب) طی یک دورهٔ ۲۰ ساله (۲۰۰۴ تا ۲۰۲۳) انجام شده است. داده‌های ایستگاه زمینی از سازمان هواشناسی ایران و داده‌های مربوط به دو پایگاه بازتحلیل از سایت ناسا برای MERRA-2 و کوپرنیکس برای ERA5-Land دریافت شدند. برای مقیاس‌کاهی برونداد دو پایگاه داده مذکور از روش نگاشت چارکی (Quantile Mapping) استفاده شد. دقت دو پایگاه بازتحلیل برای ارزیابی عملکردشان با روش‌های آماری KGE، تیلور، ضریب همبستگی پیرسن و RMSE در نرم‌افزار R به‌صورت مقایسه عمق برف برآورد شده با ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی زمینی در مقیاس زمانی ماهانه انجام گرفت. محاسبات نشان داد که روش تصحیح اریبی نگاشت چارکی (QM) برای متغیر برف قابل‌اطمینان است. پایگاه بازتحلیل ERA5 Land توانایی تشخیص عمق برف در شمال‌غرب ایران را در فصل زمستان دارد و در مقایسه با داده‌های پایگاه بازتحلیل MERRA-2 دقت بالاتری دارد. نتایج نشان داد که پایگاه بازتحلیل ERA5 Land در ایستگاه‌های مهاباد، خوی، تبریز، اهر، ارومیه و مراغه بهترین عملکرد را داشته‌اند. نتایج نشان داد با گذر از غرب منطقه شمال‌غرب ایران به سمت شرق آن بر میزان عدم قطعیت داده‌های عمق برف پایگاه بازتحلیل ERA5 Land افزوده می‌شود.

مقدمه

برف به دلیل ویژگی‌های عایق‌بندی و بازتاب بالای آن، به‌طور قابل‌توجهی بر چرخهٔ هیدرولوژی و تعادل انرژی زمین تأثیر می‌گذارد (Muelchi, Rössler, Schwanbeck, Weingartner & Martius, 2021). تغییرات یخ‌های دریای قطب شمال نیز اثرات مستقیمی بر اقلیم، اکوسیستم‌ها و شیوه‌های سنتی زندگی دارد (Meier & Stroeve, 2022). ذوب برف یخچال‌های طبیعی و لایه‌های

* نویسندهٔ مسئول: برومند صلاحی

Email: salahi@uma.ac.ir

یخ دائمی، تهدیدی جدی برای تأمین آب بسیاری از جوامع محسوب شده و احتمال وقوع سیلاب‌ها را افزایش می‌دهد (Shukla et al., 2022).

مشاهدات زمینی، شامل داده‌های جمع‌آوری‌شده از ایستگاه‌های هواشناسی، برف‌سنجی و ایستگاه‌های هیدرولوژیکی، یکی از منابع معتبر برای ارزیابی عمق برف به شمار می‌رود. با این حال، به دلیل پراکندگی مکانی ایستگاه‌ها و فقدان پوشش زمانی پیوسته در بسیاری از مناطق، به‌ویژه در نواحی کوهستانی و مرتفع، این داده‌ها به‌تنهایی پاسخ‌گوی نیاز به پایش منظم و دقیق ویژگی‌های فیزیکی برف نیستند (Li, Yang & Li, 2022). از این‌رو، بهره‌گیری از روش‌های جایگزین با قابلیت تخمین قابل‌قبول برای برآورد پارامترهای مرتبط با برف ضروری به نظر می‌رسد. در این میان، داده‌های بازتحلیل به‌عنوان ابزاری نوین و کارآمد نقش مهمی در پر کردن خلأ داده‌های زمینی ایفا می‌کنند و در سال‌های اخیر کاربرد گسترده‌ای در مطالعات مشابه یافته‌اند (Xiao, Che & Dai, 2020).

بهرامی و همکاران (Bahrami, Fathzadeh, Zaree Chahooki & Taghizadeh Mehrjerdi, 2016) اثر مقیاس پارامترهای ژئومورفومتری بر پراکنش مکانی عمق برف را بررسی کردند. داده‌های نمونه شامل ۱۰۰ نقطه با روش‌هایپرکیوب و ۱۹۵ نقطه سیستماتیک بود. پارامترهای ژئومورفومتری از یک مدل رقومی ارتفاع ۱۰ متری استخراج و در شبکه عصبی وارد شدند و تحلیل حساسیت، عوامل مهم تعیین‌کننده عمق برف را مشخص کرد. سپس ۹ مدل ارتفاعی با مقیاس‌های مختلف ساخته و روابط رگرسیونی با داده‌های نمونه برقرار شد. دقت مدل‌ها با RMSE و MAE سنجیده شد و مدل با وضوح ۱۵۰ متر بهترین عملکرد را نشان داد. یافته‌ها اهمیت انتخاب مقیاس مناسب برای بهبود دقت برآورد عمق برف و کاهش هزینه‌ها را نشان می‌دهد.

دالوز و همکاران (Daloz et al., 2020) تخمین بارش برف در مناطق کوهستانی را در کوهستان‌های بلند چهار قاره اوراسیا، آمریکای شمالی، آمریکای جنوبی و آفریقا بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که تخمین بارش برف در مقیاس جهانی با استفاده از داده‌های ERA-Interim و MERRA-2[1]، MERRA بسیار مشابه است، که این امر معتبر بودن این داده‌ها در مناطق کوهستانی را نشان می‌دهد.

بابا و همکاران (Baba et al., 2021) نیز به ارزیابی داده‌هایMERRA2 و ERA5[2] برای مدل‌سازی آب معادل برف در ارتفاعات اطلس پرداختند. این پژوهش در بازهٔ زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۹ (۳۷ سال آبی) انجام شد و خروجی‌های مدل با استفاده از مشاهدات جریان رودخانه، ارتفاع برف و مساحت پوشش برف MODIS ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که هر دو مدل MERRA-2 و ERA5 عملکرد مناسبی در بازتولید وضعیت پوشش برف برای اکثر سال‌های آبی دارند؛ به‌طور کلی، عملکرد ERA5 در مقایسه با MERRA2 در مناطق مرتفع اطلس در مراکش بهتر بوده است.

ژایو و همکاران (Zhao, Chen, Shahzad, Xia & Lin, 2024) با توسعه شبکه چندمقیاسی MFPANet توانستند برآورد عمق برف با وضوح بالا را به‌طور دقیق انجام دهند؛ نتایج آن‌ها نشان داد این روش نسبت به رویکردهای پیشرفته موجود دقت بیشتری دارد
(RMSE = ۰/ ۳۶ و MAE = ۰/۱۲۸). هی و همکاران (He et al., 2024) با استفاده از داده‌های رادیومتر مایکروویو غیرفعال، عمق برف روزانه بر روی یخ دریای قطب شمال را در طول زمستان تخمین زدند. الگوریتم بهبودیافته آن‌ها دقت مناسبی نشان داد (ضریب همبستگی ۰/۶ تا ۰/ ۷۲ و خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) که بین ۶/۱۸ تا ۷/۵۳ سانتی‌متر متغیر است) و توانست تغییرات فصلی عمق برف را در کل فصل زمستان (اکتبر تا آوریل) با موفقیت ثبت کند.

1- Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2
2- ECMWF Reanalysis version 5

نقی‌زاده و همکاران (Naghizadeh, Rasouly, Sari Sarraf, Jahanbakhsh & Babaian, 2019) روند عمق برف در شمال ایران را طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵ با داده‌های ECMWF[1] نسخه ERA Interim و آزمون‌های ناپارامتریک Mann–Kendall و Sen's slope بررسی کردند. تحلیل‌ها نشان داد که بیشتر مناطق، روند کاهشی معناداری دارند، به‌ویژه در استان‌های قزوین، زنجان، آذربایجان شرقی و تهران. افزایش عمق برف تنها در البرز مرکزی طی ماه‌های اکتبر و نوامبر معنی‌دار بود، درحالی‌که زمستان بیشترین کاهش را تجربه کرده و بیش از ۹۶ درصد پهنه‌های هم‌روند کاهش چشمگیر نشان دادند.

آصفی و فتح‌زاده (Asefi & Fathzadeh, 2022) با استفاده از داده‌های میدانی، تصاویر لندست ۸ و شاخص NDSI به شبیه‌سازی عمق برف در حوزه چلگرد پرداختند و نشان دادند شبکه عصبی مصنوعی بهترین عملکرد را داشت، هرچند کاهش ویژگی‌ها با PCA به بهبود مدل منجر نشد. در ادامه، آصفی و همکاران (Asefi, Fathzadeh, Taghizadeh-Mehrjardi & Zare Chahooki, 2023) با ترکیب ماشین بردار پشتیبان و الگوریتم ژنتیک دقت برآورد عمق برف را به‌طور چشمگیری افزایش دادند (R^2=0.95، RMSE≈3.97 cm).

حاجی‌محمدی و حاجی‌وند (Haji Mohammadi & Hajivand, 2023) با استفاده از داده‌های ECMWF و مشاهدات ۱۳ ایستگاه در خوزستان (۲۰۰۰–۲۰۱۶)، الگوهای گردوغبار را بررسی کردند. نتایج نشان داد انتقال ذرات از عراق و سوریه و ناپایداری‌های جوی نقش اصلی در رخدادها داشتند. مجیدی کرهرودی و همکاران (Majidi Karhroudi, Sabetghadam & Gharaylou, 2024) تغییرات عمق برف در قله‌های دماوند، دنا، زردکوه و هزار را طی دوره ۱۹۸۰–۲۰۲۰ با داده‌های MERRA-2 تحلیل کردند. یافته‌ها حاکی از تغییرپذیری سالانه بدون روند معنادار بود و نشان داد دما و عرض جغرافیایی در ماندگاری برف اثر بیشتری نسبت به ارتفاع دارند.

خوش‌اخلاق و همکاران (Khoshakhlagh, Haji Mohammadi & Koshky, 2024) شرایط جوی فون در آتش‌سوزی جنگل‌های شمال ایران را بررسی کردند. داده‌های ایستگاهی و بازتحلیل نشان داد حضور هم‌زمان پرفشار جنوب و کم‌فشار پشت‌باد البرز، گرادیان شدید فشار و جریان جنوبی را به سمت شمال تقویت کرده است. میرموسوی و حیدری منفرد (Mirmousavi & Heidari Monfared, 2024) تغییرات مکانی–زمانی پوشش برف در شمال‌غرب ایران (۱۹۸۲–۲۰۲۲) را با داده‌های ERA5 و ۲۰ ایستگاه بررسی کردند. نتایج نشان داد پوشش برف در منطقه دارای خودهمبستگی فضایی و الگوی خوشه‌ای شدید است.

مجیدی کرهرودی و همکاران (Majidi Karhroudi, Gharaylou & Sabetghadam, 2024) عملکرد داده‌های بازتحلیل ERA5 و MERRA-2 را در تخمین عمق برف شمال‌غرب ایران طی دوره ۱۹۸۱–۲۰۲۰ با داده‌های ایستگاهی مقایسه کردند. نتایج نشان داد ERA5 تمایل به فروتخمین و MERRA-2 اغلب به فراتخمین دارد. همچنین، عدم قطعیت ERA5 با افزایش عرض جغرافیایی و ارتفاع بیشتر می‌شود، در حالی‌که در MERRA-2 عمدتاً به عرض جغرافیایی وابسته است.

با توجه به اهمیت منابع آبی ناشی از برف در شمال‌غرب ایران، ارزیابی دقیق عمق برف در این منطقه از منظر اقلیمی و مدیریتی ضرورتی انکارناپذیر است. در سال‌های اخیر، داده‌های بازتحلیل نظیر ERA5-Land و MERRA-2 به‌عنوان جایگزینی برای داده‌های ایستگاهی مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ بااین‌حال، دقت و قابلیت اعتماد آن‌ها در مناطق کوهستانی با توپوگرافی پیچیده همچنان نیازمند ارزیابی جامع است. از سوی دیگر، بخش عمده‌ای از پژوهش‌های گذشته بر متغیرهایی همچون دما و بارش متمرکز بوده و مطالعات تطبیقی در زمینه عملکرد این داده‌ها برای برآورد عمق برف زمستانی در مقیاس فصلی کمتر انجام شده است. علاوه بر این، محدودیت پوشش مکانی ایستگاه‌های زمینی سبب می‌شود تحلیل عملکرد داده‌های بازتحلیل در پایش و مدل‌سازی مؤلفه‌های برف، به‌ویژه در نواحی برف‌گیر، از اولویت‌های اصلی پژوهشی محسوب گردد.

1- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

این پژوهش با تمرکز بر ارزیابی هم‌زمان داده‌های ERA5-Land و MERRA-2 در مقیاس فصلی زمستان طی دوره ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۳ و با بهره‌گیری از داده‌های ۱۰ ایستگاه شمال‌غرب ایران، نوآوری‌های قابل‌توجهی ارائه می‌دهد. در این مطالعه، برای مقیاس‌کاهی و اصلاح داده‌ها، روش آماری Quantile Mapping به‌صورت ماهانه و ایستگاه‌محور به کار گرفته شد. همچنین، دقت داده‌های بازتحلیل با استفاده از شاخص KGE، نمودار تیلور و PBIAS در محیط R به‌طور ترکیبی و مقایسه‌ای ارزیابی گردید. علاوه بر این، ترسیم نمودارهای جعبه‌ای فصلی به‌منظور مقایسه عملکرد مدل‌ها در ایستگاه‌های مختلف، از دیگر جنبه‌های نوآورانه این تحقیق به شمار می‌آید.

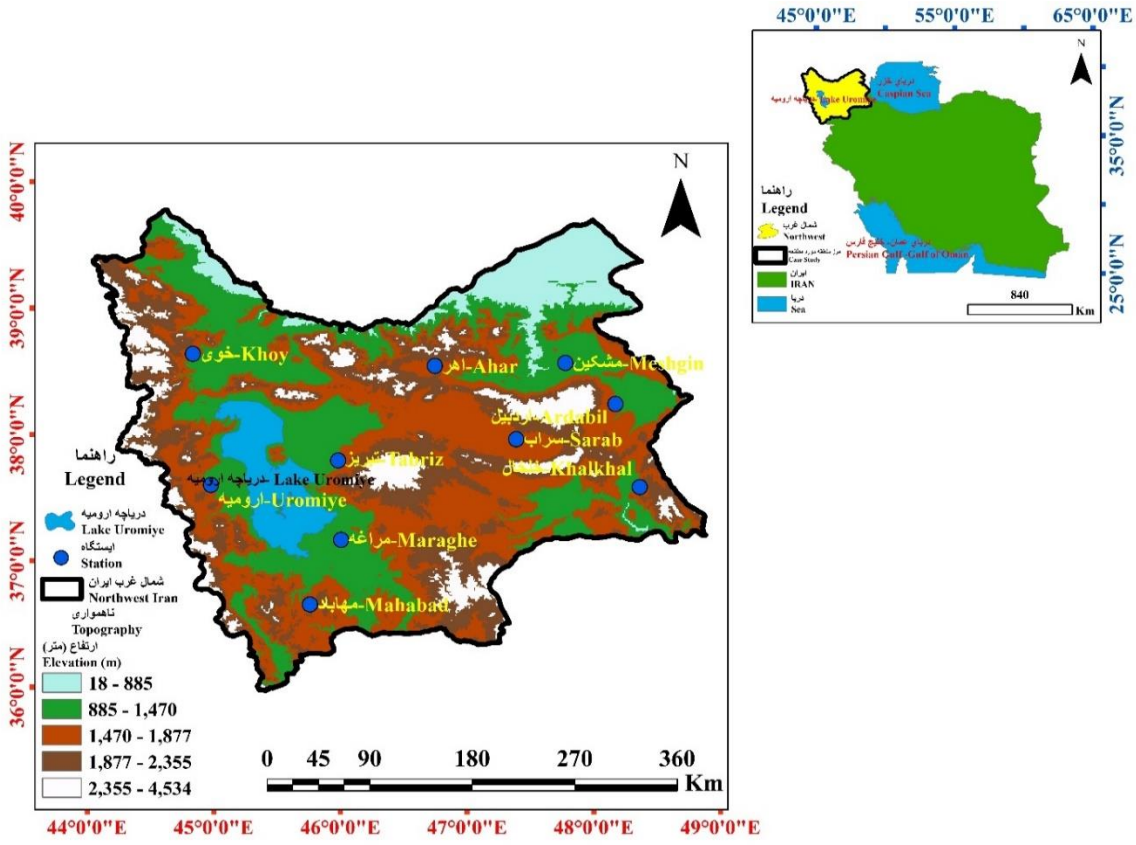
منطقهٔ مورد مطالعه

منطقهٔ مورد مطالعه در این پژوهش شمال غرب ایران است که در محدوده عرض‌های جغرافیایی ۳۶ تا ۴۰ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۴ تا ۴۹ درجه شرقی قرار گرفته است و شامل سه استان اردبیل، آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی می‌شود. در این مطالعه، از ۱۰ ایستگاه منتخب (جدول ۱) واقع در منطقه شمال غرب ایران استفاده شده است (شکل ۱).

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی همدید شمال غرب ایران

Table 1. Geographic locations of synoptic meteorological stations in northwestern Iran

ردیف Row	ایستگاه هواشناسی Meteorological Station	استان Province	ارتفاع (متر) Elevation (m)	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude
1	مشکین‌شهر Meshgin shahr	اردبیل Ardabil	1560.6	47.68	38.38
2	اردبیل Ardabil		1335.2	48.33	38.22
3	خلخال Khalkhal		1797.4	48.54	37.61
4	خوی Khoy	آذربایجان غربی West Azerbaijan	1103.4	45	38.56
5	ارومیه Uromiye		1328	45.06	37.66
6	مهاباد Mahabad		1351.8	45.72	36.75
7	اهر Ahar	آذربایجان شرقی East Azerbaijan	1391	47.07	38.43
8	تبریز Tabriz		1361	46.24	38.12
9	سراب Sarab		1682	47.53	37.93
10	مراغه Maraghe		1344	46.15	37.35



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig. 1. Geographical location of the study area

مواد و روش‌ها

در این پژوهش داده‌های عمق برف روزانه (برحسب سانتی‌متر) برای ۱۰ ایستگاه سینوپتیک منتخب واقع در شمال غرب ایران در دورهٔ ۲۰ ساله (۲۰۲۳-۲۰۰۴) از سازمان هواشناسی ایران (www.irimo.ir) اخذ گردید؛ با وجود تمایل به انتخاب دورهٔ بلندمدت (۳۰ ساله)، به دلیل عدم وجود داده و ناقص بودن داده‌ها در برخی ایستگاه‌ها بازهٔ ۲۰ ساله با داده‌های کامل برای افزایش دقت تحلیل استفاده شد. سپس به علت ارزیابی در مقیاس ماهانه (۳ ماه ژانویه، فوریه و دسامبر از فصل زمستان)، مقادیر میانگین ماهانه عمق برف برای هر ایستگاه (۱۰ ایستگاه همدیدی ذکر شده در جدول ۱) محاسبه گردید. در گام بعدی برای مقایسه و واکاوی عملکرد دو پایگاه بازتحلیل ERA5 Land و MERRA 2، داده‌های خام عمق برف در مقیاس زمانی ماهانه برای ایستگاه‌های مورد مطالعه، توسط دو پایگاه داده مذکور استخراج گردید (میانگین ماهانه). داده‌های مربوط به ERA5 Land از تارنمای کوپرنیکس[1] و همچنین داده‌های عمق برف مورد نیاز از پایگاه MERRA 2 از سایت ناسا[2] اخذ گردید در این پژوهش، از داده‌های بازتحلیل ERA5-Land استفاده شد که وضوح مکانی بالاتری نسبت به ERA5 داشته و برای تحلیل‌های سطح خشکی از جمله برف، دقیق‌تر عمل می‌کند. مشخصات فنی دو پایگاه داده بازتحلیل در جدول (۲) ارائه شده است.

1- https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land?tab=overview
2- https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?keywords=MERRA-2&page=1

جدول ۲- مقایسهٔ مشخصات فنی پایگاه‌های داده عمق برف

Table 2- Comparison of technical specifications of snow depth databases

ERA5-Land	MERRA-2	ویژگی Feature
بازتحلیل Reanalysis	بازتحلیل Reanalysis	**نوع داده** **Data Type**
ECMWF	NASA-GMAO	**تولیدکننده** **Source**
Snow Depth	Snow Depth	**متغیر مربوط به برف** **Snow-Related Variable**
متر(m) Meter (m)	متر(m) Meter (m)	**واحد** **Unit**
~0.1° (~9 km)	0.5°×0.625° (~50×66 km)	**وضوح مکانی** **Spatial Resolution**
ساعتی، روزانه، ماهانه hourly, daily, monthly	سه‌ساعته، روزانه، ماهانه 3-hourly, daily, monthly	**وضوح زمانی** **Temporal Resolution**
1981تاکنون From 1981 to present	1980تاکنون From 1980 to present	**بازه زمانی** **Time Period**
فقط خشکی Only land	دریا و خشکی land and sea	**پوشش جغرافیایی** **Geographical Coverage**
NetCDF	NetCDF / HDF	**فرمت داده** **Data Format**
CDS-Copernicus	NASA GES DISC	**منبع دریافت** **Data Source**

References: NASA's Global Modeling and Assimilation Office (GMAO), European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

در این مطالعه، داده‌های عمق برف از دو پایگاه بازتحلیل ERA5-Land و MERRA-2 برای ۱۰ ایستگاه هواشناسی در شمال غرب ایران جمع‌آوری شد. نام ایستگاه‌ها شامل اردبیل، مشکین‌شهر، خلخال، ارومیه، خوی، مهاباد، تبریز، مراغه، سراب و اهر است و داده‌ها در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۳ مورد استفاده قرار گرفت. تمامی داده‌ها به‌صورت ساعتی یا روزانه (تبدیل به ماهانه برای تحلیل فصلی) از پایگاه‌های رسمی هر بازتحلیل دریافت شد:

ERA5-Land از طریق پایگاه Copernicus Climate Data Store (CDS) و با فرمتNetCDF ، سپس با استفاده از نرم‌افزار R پردازش و به داده‌های ماهانه ایستگاهی تبدیل گردید.

MERRA-2 از طریق پایگاه رسمی NASA GMAO و با فرمت NetCDF4 دریافت شد و مشابه ERA5-Land، پردازش و استخراج داده‌های ماهانه برای هر ایستگاه انجام شد. در این تحقیق، داده‌ها ماهانه و ایستگاه محور بوده و تمرکز بر داده‌های بازتحلیل سطح زمین (reanalysis) بوده است.

بعد از دریافت داده‌های دو پایگاه داده بازتحلیل در مقیاس زمانی ماهانه، به دلیل داشتن واحد متر برای پارامتر عمق برف، به واحد سانتی‌متر تبدیل شدند. برای ارزیابی دقت هر کدام از دو پایگاه داده، از طریق نمودار تیلور، مقایسه با داده‌های دیدبانی انجام گرفت. برای این منظور از ۳۰ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه (سه ایستگاه منتخب از ۱۰ ایستگاه) با توجه به پراکندگی مناسب در منطقه، اقلیم متفاوت، دوری از هم بر اساس کیلومتر و داشتن ارتفاع متفاوت انتخاب شدند و ارزیابی بر روی آن‌ها صورت گرفت.

به علت نتایج ضعیف داده‌های عمق برف دو پایگاه داده در نمودار تیلور، برونداد خام هر دو پایگاه بازتحلیل با استفاده از روش نگاشت چارکی (QM) مقیاس‌کاهی گردید. در گام بعدی نتایج مقیاس‌کاهی شده سه ایستگاه منتخب (خلخال، ارومیه و تبریز) با مقادیر خام سه ایستگاه برای عمق برف مقایسه شد. محاسبات نشان از برتری عملکرد نتایج مقیاس کاهی داشت و مراحل بعدی با داده‌های مقیاس‌کاهی شده ایستگاه‌ها (برای همه ۱۰ ایستگاه) اجرا شد. با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقهٔ مورد مطالعه و داشتن توپوگرافی کوهستانی با شرایط مساعد برای بارش برف در فصل زمستان (بارش برف قابل‌توجه در این فصل) واکاوی عمق برف در شمال غرب ایران و در فصل زمستان، ماه‌های ژانویه، فوریه و دسامبر انجام گرفت. در مرحلهٔ بعد با استفاده از شاخص‌های آماری همبستگی پیرسن، ریشه دوم میانگین مربعات خطا و کلینگ گوپتا، ارزیابی زمانی (سه ماه زمستان) و مکانی (۱۰ ایستگاه همدیدی) عمق برف بر اساس پایگاه‌های بازتحلیل ERA5 Land و MERRA 2 توسط نمودار میله‌ای در محیط نرم‌افزار R انجام شد. در گام بعدی برای هر ایستگاه در هر ماه از فصل زمستان مقدار شاخص درصد بایاس (PBIAS) به تفکیک برونداد هر دو پایگاه داده بازتحلیل محاسبه شد و سپس بایاس (مقدار اریبی‌های دو پایگاه داده) هر ایستگاه در هر ماه به دست آمد. بر اساس مقدار بایاس محاسبه شده برای هر سه ماه جداگانه در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی پهنه‌بندی ترسیم شد. (درون‌یابی به روش معکوس فاصله وزنی انجام گرفت). در نهایت برای داشتن دید بصری مناسب و تفکیکی از عملکرد دو پایگاه بازتحلیل برای شناسایی عمق برف در شمال غرب ایران در ۱۰ ایستگاه و فصل زمستان از نمودار جعبه‌ای که در محیط R ترسیم شده استفاده گردید.

نگاشت چارکی (Quantile Mapping)

نگاشت چارکی (Quantile Mapping) یکی از رایج‌ترین تکنیک‌های اصلاح سوگیری مدل‌های اقلیمی به شمار می‌رود که نخستین بار توسط پانوفسکی و بریر (Brier & Panofsky, 1968) در سال ۱۹۶۸ معرفی شد. این روش با بهره‌گیری از توابع توزیع تجمعی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده، در بازه‌های زمانی مختلف، به کاهش خطاهای سیستماتیک کمک می‌کند. در اصل، این تکنیک مقدار مدل را با مقدار متناظر آن در توزیع مشاهداتی جایگزین می‌نماید؛ به‌گونه‌ای که مقدار مدل به چارکی خاص در توزیع تاریخی مدل نسبت داده شده و سپس مقدار مشاهده‌شده متناظر با همان چارک به‌عنوان مقدار اصلاح‌شده در نظر گرفته می‌شود (Hamidianpour & Shoja, 2022). از نظر ریاضی رابطه تصحیح اریبی نگاشت چارک به صورت زیر است (رابطه ۱) (Lanzante, Adams-Smith, Dixon, Nath & Whitlock, 2020).

$$F_{DF}(X) = F_{Oh}[F^{-1}_{Mh}(X)] \quad (۱)$$

در رابطهٔ فوق، F نشان دهنده تابع توزیع تجمعی و F^{-1} معکوس آن است. در فرآیند ریزمقیاس‌سازی با استفاده از روش نگاشت چارک، ابتدا موقعیت نسبی مقدار موردنظر در تابع توزیع تجمعی مدل (Mh) تعیین می‌شود. سپس، مقدار متناظر با همین موقعیت نسبی از تابع توزیع مشاهداتی (Oh) استخراج و به‌عنوان مقدار ریزمقیاس‌شده تخصیص می‌یابد. ازآنجا که این روش صرفاً بر اساس ویژگی‌های توزیعی داده‌های مدل و مشاهدات عمل می‌کند، در چارچوب روش‌های اصلاح سوگیری جای می‌گیرد (Hamidianpour & Shoja, 2022).

نمودار تیلور

نمودار تیلور ابزاری گرافیکی است که برای نمایش هم‌زمان سه شاخص آماری مهم در مقایسه بین داده‌های مدل‌سازی و مشاهداتی به کار می‌رود. این سه شاخص عبارت‌اند از:

۱) ضریب همبستگی(R)، ۲) انحراف معیار(SD) و ۳) ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)

این نمودار در چارچوب مختصات قطبی طراحی شده است، به‌گونه‌ای که موقعیت هر مدل نسبت به نقطهٔ مرجع (که نمایندهٔ داده‌های مشاهده شده است) تعیین‌کنندهٔ دقت آن مدل است؛ هرچه فاصله نقطهٔ مدل از مرجع کمتر باشد، عملکرد مدل بهتر ارزیابی می‌شود. در این نمودار، محور شعاعی معرف انحراف معیار بوده و زاویه نسبت به محور افقی گویای میزان همبستگی است. همچنین، خطوط

منحنی متحدالمرکز پیرامون نقطهٔ مرجع نشان‌دهنده سطوح مختلف *RMSE* هستند. این ابزار کاربرد گسترده‌ای در سنجش دقت مدل‌های اقلیمی، هیدرولوژی و داده‌های بازتحلیل دارد (Taylor, 2001).

شاخص KGE

شاخص کلینگ_گوپتا (KGE) یکی از معیارهای ترکیبی برای سنجش میزان تطابق بین داده‌های مدل‌سازی (اعم از مدل عددی یا بازتحلیل) و داده‌های مشاهده‌شده است. این شاخص توسط گوپتا و همکاران (Gupta, Kling, Yilmaz & Martinez, 2009) به‌عنوان نسخه‌ای بهبودیافته از شاخص Nash–Sutcliffe توسعه داده شد. رابطه ریاضی KGE (رابطه ۲) به‌گونه‌ای تعریف شده است که سه مؤلفه کلیدی ارزیابی تطابق یعنی ضریب همبستگی، میزان بایاس و نسبت پراکندگی را به‌صورت مستقل و با وزن برابر در نظر می‌گیرد. این ویژگی باعث شده که KGE نسبت به NSE مزیت روش‌شناختی مهمی داشته باشد. مقدار KGE برابر با ۱ نشانگر انطباق کامل مدل با داده‌های واقعی است (Knoben et al., 2019).

$$KGE = 1 - \sqrt{((r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2)} \quad (۲)$$

که در آن:

R (ضریب همبستگی پیرسون بین مشاهدات و شبیه‌سازی‌ها)؛ $\beta = \mu_s / \mu_o$ (نسبت میانگین شبیه‌سازی به مشاهدات)؛

$\gamma = CV_s / CV_o$ (نسبت ضریب تغییرات شبیه‌سازی به مشاهدات)

شاخص PBIAS

شاخص PBIAS (درصد بایاس) یکی از شاخص‌های پرکاربرد برای ارزیابی عملکرد مدل‌های شبیه‌سازی و بازتحلیل در مقایسه با داده‌های مشاهداتی است. این شاخص میزان تمایل سیستم مدل‌سازی به بیش برآورد یا کم برآورد داده‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. فرمول PBIAS (۳) به‌صورت زیر تعریف می‌شود (Moriasi et al., 2007).

$$PBIAS = 100 \times (\Sigma(S_i - O_i) / \Sigma O_i) \quad (۳)$$

که در آن: Siمقدار شبیه‌سازی‌شده در زمانi ، Oi مقدار مشاهده‌شده در زمان i و Σ علامت جمع برای تمام i هاست. تفسیر علامت‌ها: : PBIAS > 0مدل تمایل به بیش برآورد دارد. PBIAS < 0: مدل تمایل به کم برآورد دارد. اختلاف بایاس بین دو پایگاه داده بازتحلیل از رابطه (۴) محاسبه شد.

$$\Delta BIAS = BIAS(ERA5\ Land) - BIAS(MERRA\ 2) \quad (۴)$$

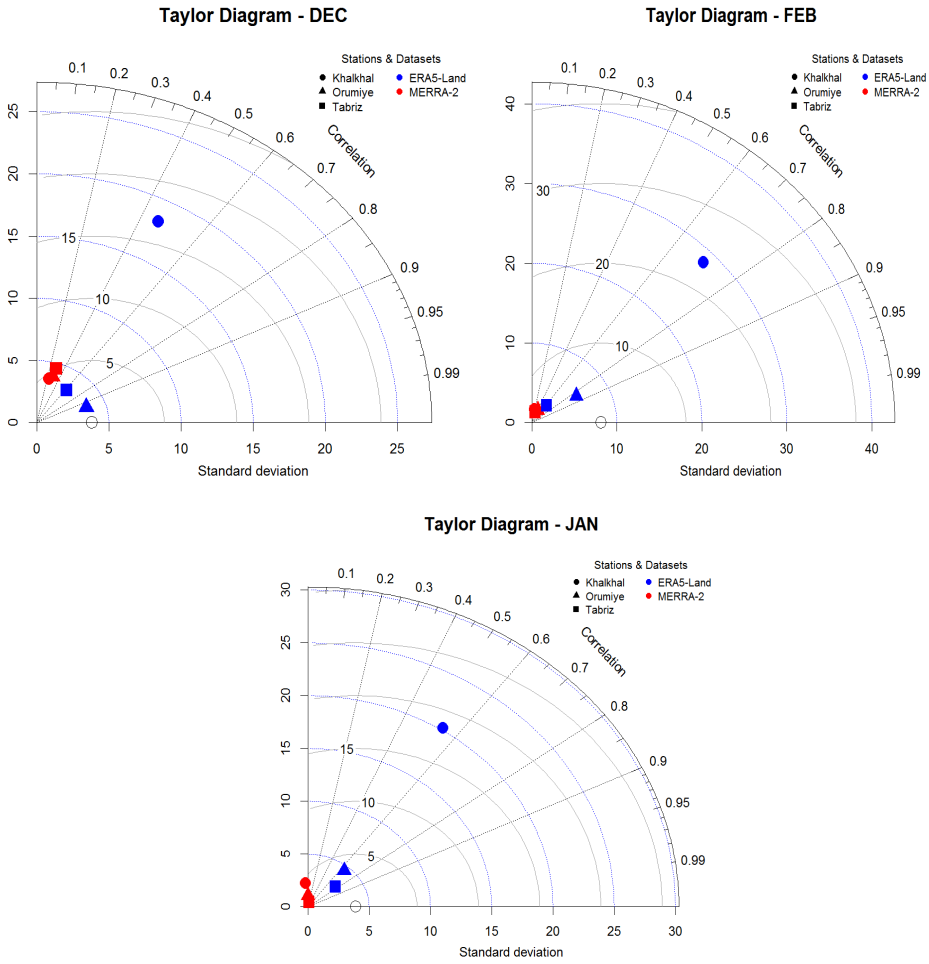
تفسیر علامت‌ها: هر کدام دارای مقدار بایاس کم‌تری بودند، تخمین دقیق‌تر داشته‌اند.

اندازه Δ BIAS نشان دهندهٔ دوری یا نزدیکی عملکرد دو پایگاه داده نسبت به هم می‌باشد.

در این پژوهش، نگاشت چارکی (Quantile Mapping) برای تصحیح بایاس داده‌های بازتحلیل، نمودار تیلور برای ارزیابی تطابق فضایی، شاخص KGE برای سنجش عملکرد کلی مدل و شاخص PBIAS برای بررسی انحراف سیستماتیک استفاده شد. این شاخص‌ها امکان ارزیابی دقیق و مقایسه‌ای داده‌ها در سطح ایستگاه و پهنه‌ای را فراهم کردند. تمامی پردازش‌ها و تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای R و GIS انجام شد.

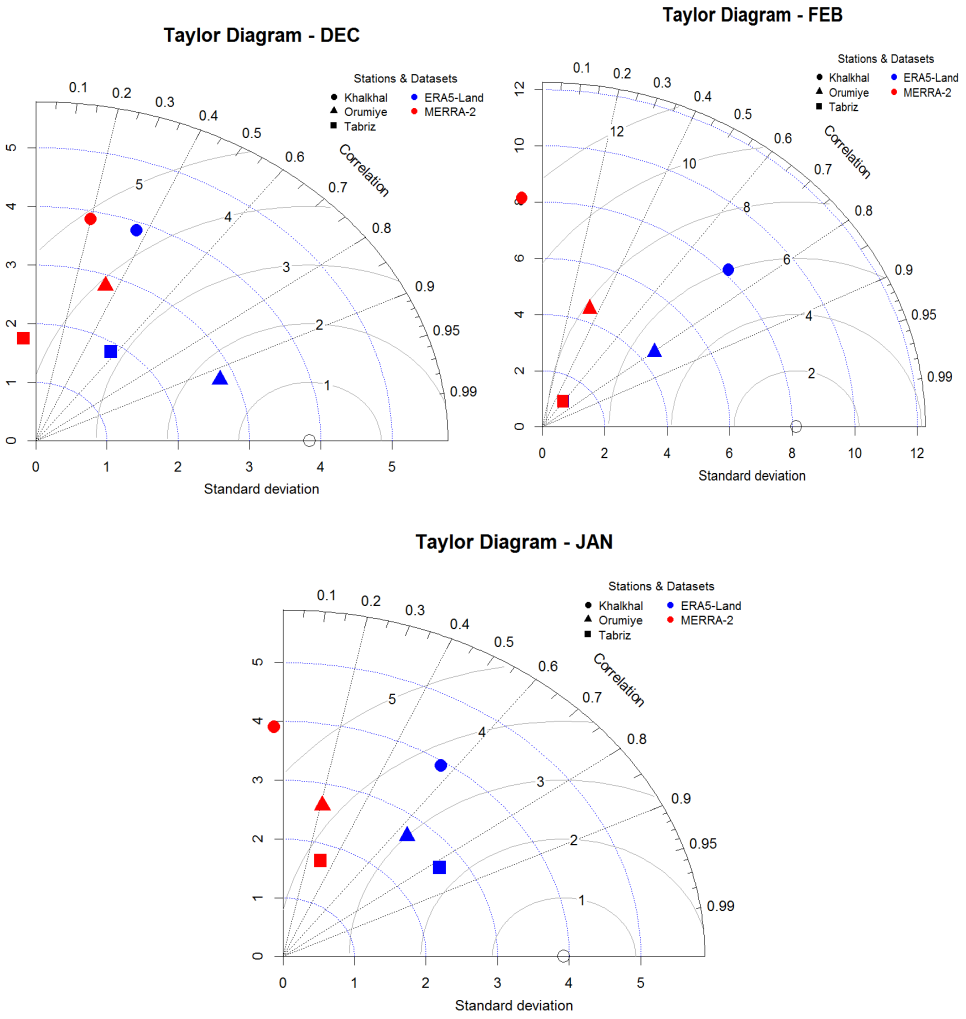
نتایج و بحث

مطابق شکل ۲ برونداد خام دو پایگاه داده در سه ایستگاه منتخب (خلخال، ارومیه و تبریز) در منطقهٔ مورد مطالعه توسط نمودار تیلور صحت‌سنجی شدند و شکل ۳ راستی آزمایی برونداد مقیاس‌کاهی شده داده‌های عمق برف برای سه ایستگاه مذکور در فصل زمستان توسط نمودار تیلور را نشان می‌دهد. بر اساس مقایسه شکل‌های ۲ (قبل مقیاس‌کاهی) و ۳ (بعد مقیاس‌کاهی) که در دو وضعیت قبل و بعد از مقیاس‌کاهی را نشان می‌دهند، از سه پارامتر مربوط به نمودار تیلور، در ضریب همبستگی پیرسن تغییری دیده نشد، ولی در دو پارامتر دیگر تغییرات محسوس است به‌طوری‌که قبل از مقیاس‌کاهی، نوسانات و پراکندگی در داده‌های هر دو پایگاه نسبت به مرجع زیاد بوده و همچنین خطای RMSE عدد بزرگ‌تری دارد؛ اما بعد مقیاس‌کاهی، کاهش خطا و انحراف استاندارد در مقیاس‌های زمانی و مکانی مشهود است. در مجموع با توجه به سنجه آماری تیلور، انجام مقیاس‌کاهی قبل از استفاده از داده‌های عمق برف برای هر دو پایگاه الزامی است و کارایی پایگاه بازتحلیل ERA5 Land در این مطالعه، از لحاظ مکانی (ایستگاه) و زمانی (فصلی) بر پایگاه داده MERRA 2 برتری دارد.



شکل ۲- نمودار تیلور ایستگاه‌های نماینده شمال غرب ایران جهت صحت سنجی برونداد خام عمق برف توسط دو پایگاه بازتحلیل

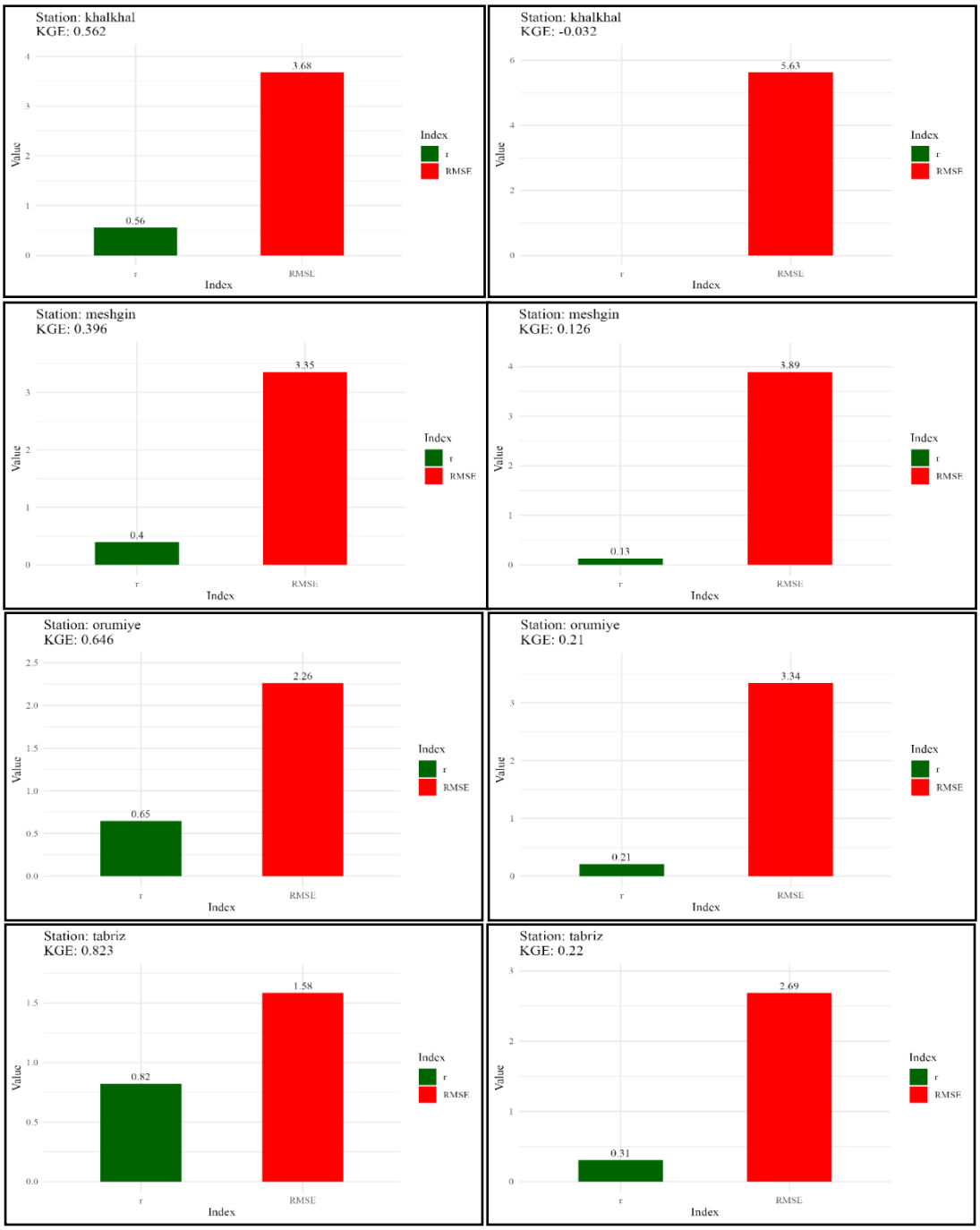
Fig. 2. Taylor diagram of representative stations in northwestern Iran for validating raw snow depth outputs from two reanalysis datasets



شکل ۳– نمودار تیلور ایستگاه‌های نماینده شمال غرب ایران جهت صحت سنجی برونداد مقیاس‌کاهی شده عمق برف توسط دو پایگاه بازتحلیل

Fig. 3. Taylor diagram of representative stations in northwestern Iran for validating downscaled snow depth outputs from two reanalysis datasets

مطابق نتایج نمودار تیلور، از داده‌های مقیاس‌کاهی شده هر دو پایگاه داده بازتحلیل برای ارزیابی عمق برف استفاده شد. برای واکاوی دقیق داده‌های عمق برف دو پایگاه داده از ترسیم نمودار میله‌ای در محیط R بر اساس سنجه‌های ضریب همبستگی پیرسن، ریشهٔ دوم میانگین مربعات خطا و کلینگ گوپتا استفاده شد. برای این منظور برای هر ایستگاه همدیدی در هر سه ماه از فصل زمستان در دوره ۲۰ ساله نمودار میله‌ای به دست آمد (شکل ۴). با توجه به محدودیت صفحات مقاله، از میان بررسی‌های انجام‌شده برای ۱۰ ایستگاه همدیدی، شکل ۴ به‌عنوان نمونه ارائه شد. نتایج مربوط به تمام ایستگاه‌ها برای هر سه ماه و به تفکیک دو پایگاه باز تحلیل نیز در قالب جدول ارائه خواهد شد. بر اساس شکل ۴ در ماه ژانویه، در چهار ایستگاه مذکور، مطابق نمودار گرافیکی، محاسبات سنجه‌های همبستگی، RMSE و KGE نشان داد که دقت برآورد عمق برف توسط پایگاه بازتحلیل ERA5 Land بالاتر از پایگاه بازتحلیل MERRA 2 است. در مقایسه صورت گرفته در برونداد ERA5 Land خطای ریشه دوم میانگین مربعات کمتر، کلینگ گوپتا و ضریب همبستگی بیشتر از مقادیر مشابه در MERRA 2 بود. بیشینه دقت پایگاه ERA5 Land در ایستگاه همدیدی تبریز مشاهده شد.



شکل ۴- نمودار ایستگاه‌های مشکین‌شهر، تبریز، خلخال و ارومیه جهت صحت سنجی برونداد عمق برف توسط دو پایگاه بازتحلیل در ماه ژانویه (نمودارهای سمت چپ era5 Land و سمت راست MERRA 2)

Fig. 4. Bar charts of Meshkin-Shahr, Tabriz, Khalkhal, and Orumiye stations for validating snow depth outputs from two reanalysis datasets in January (left charts: ERA5-Land; right charts: MERRA-2)

مطابق جدول ۳ خروجی نمودار میله‌ای ترسیم شده در محیط نرم‌افزاری R، برای همه ایستگاه‌ها در منطقهٔ مورد مطالعه بر اساس شاخص‌های آماری و ۲ پایگاه بازتحلیل در فصل زمستان ارائه شد. با توجه به مقادیر سنجه‌های ضریب همبستگی، ریشه دوم میانگین مربعات خطا و کلینگ گوپتا در همه ماه‌ها و در همه ایستگاه‌ها پایگاه ERA5 Land با دقت بهتر عمق برف در شمال غرب ایران را در مقایسه با داده‌های MERRA 2 تخمین زده است. مقادیر کلینگ گوپتای مربوط به پایگاه ERA5 Land مثبت و با بزرگی نزدیک به عدد ۱ و در چند ایستگاه دقیقاً ۱ را نشان دادند در صورتی‌که مقدار سنجه فوق برای پایگاه MERRA 2 مقادیر کوچک و نزدیک به صفر و در چند ایستگاه منفی نیز بوده است. بر اساس شاخص آماری RMSE بیشینه و کمینه خطا در ایستگاه‌های (سراب و خلخال) و (خوی، مراغه و مهاباد) مشاهده شد. با توجه به سنجه‌های R و KGE بهترین و بدترین کارایی پایگاه‌ها به ترتیب در ایستگاه‌های همدیدی (ارومیه، خوی، مراغه، مهاباد و اهر) و (سراب، اردبیل، خلخال و تبریز) رؤیت شد.

جدول ۳- مقایسهٔ دقت داده‌های بازتحلیل ERA5-Land و MERRA-2 در ۱۰ ایستگاه شمال غرب ایران بر اساس شاخص KGE و RMSE برای سه ماه زمستانی

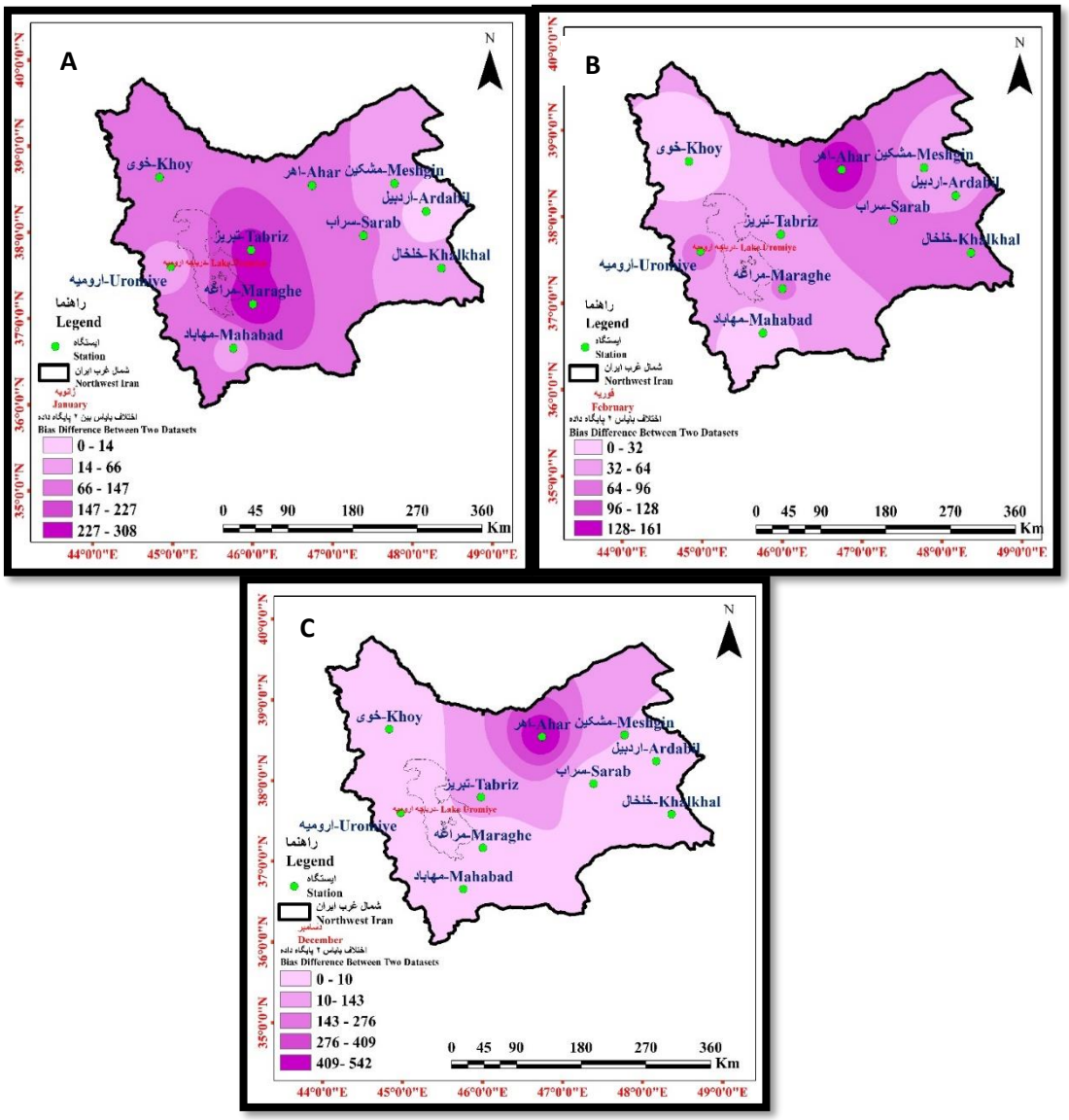
Table 3- Accuracy comparison of ERA5-Land and MERRA-2 reanalysis data at 10 meteorological stations in Northwest Iran based on KGE and RMSE for three winter months

RMSE دسامبر Dec.		**RMSE** فوریه Feb.		**RMSE** ژانویه Jan.		**KGE** دسامبر Dec.		**KGE** فوریه Feb.		**KGE** ژانویه Jan.		**R** دسامبر Dec.		**R** فوریه Feb.		**R** ژانویه Jan.		**شاخص Index ایستگاه Station**
MERRA-2	**ERA5-Land**	**MERRA-2**	**ERA5-Land**	**MERRA-2**	**ERA5-Land**	**MERRA-2**	**ERA5-Land**	**MERRA-2**	**ERA5-Land**	**MERRA-2**	**ERA5-Land**	**MERRA-2**	**ERA5-Land**	**MERRA-2**	**ERA5-Land**	**MERRA-2**	**ERA5-Land**	**پایگاه داده Data base**
3.3	3.21	4.04	2.9	2.14	2.31	.3	.36	-.01	.47	.5	.46	.33	.4	0	.5	.53	.5	**اردبیل** Ardabil
3.69	2.81	4.71	5.62	3.89	3.35	.45	.68	.4	.2	.12	.39	.45	.7	.41	.21	.13	.4	**مشکین** Meshgin
4.87	4.33	11.98	5.99	5.63	3.68	.2	.36	-.08	.7	-.03	.56	.2	.4	0	.73	0	.6	**خلخال** Khalkhal
2.67	1.72	1.02	1.02	2.69	1.58	-.09	.56	.59	.59	.22	.8	0	.6	.6	.6	.31	.82	**تبریز** Tabriz
4.34	3.31	3.15	1.78	2.73	1.87	.05	.6	.2	.8	.33	.8	.11	.62	.22	.8	.44	.8	**اهر** Ahar
2.51	2.04	3	2.5	5.64	6.29	.2	.47	.03	.3	.09	-.1	.21	.5	.04	.33	.1	0	**سراب** Sarab
3.23	1.07	5.14	2.8	3.34	2.26	.34	.9	.3	.8	.2	.64	.35	.93	.34	.8	.21	.65	**ارومیه** Uromiye
2.07	.96	3.89	1.86	1.94	1.63	.26	.84	.01	.8	.35	.6	.3	.84	.02	.8	.37	.61	**خوی** Khoy
2.08	.05	1.33	.83	2.05	2.31	.01	.99	.34	.74	.1	.27	.01	1	.4	.8	.19	.3	**مراغه** Maraghe
3.45	.16	4.78	2.16	4	3.18	.45	.99	.2	.84	.17	.48	.5	1	.23	.9	.2	.5	**مهاباد** Mahabad

با توجه به شکل ۵، پهنه‌بندی فصلی (به تفکیک هر ماه زمستان) عملکرد دو پایگاه داده بر اساس مقدار بایاس (رابطه ۴) ترسیم شد. در نقشه (الف) برای ماه ژانویه حداکثر اختلاف مقدار تخمین عمق برف در منطقه مورد مطالعه ۳۰۸ سانتی‌متر بوده است. کمینه اختلاف از لحاظ مکانی در بخش شرقی به‌ویژه در ایستگاه اردبیل رؤیت شد و بیشینهٔ اختلاف مکانی در ارزیابی عمق برف در بخش مرکزی در ایستگاه‌های تبریز و مراغه مشاهده گردید. در نقشه (ب) برای ماه فوریه، بیشینهٔ اختلاف بین دو پایگاه داده در بخش شمالی منطقهٔ مورد مطالعه به‌خصوص در ایستگاه اهر بوده است. کمینه اختلاف دو پایگاه بازتحلیل در بخش غربی منطقه شمال غرب ایران به‌ویژه در ایستگاه‌های مهاباد و خوی مشاهده شد. حداکثر اختلاف ارزیابی عمق برف توسط دو پایگاه ۱۶۱ سانتی‌متر بوده است. در نقشه (ج) برای ماه دسامبر بیشینه اختلاف بین دو پایگاه داده به ۵۴۲ سانتی‌متر رسیده است. بیش‌ترین اختلاف در بخش شمالی در ایستگاه اهر مشاهده شد. در بخش‌های جنوبی، غربی و شرقی منطقه مورد مطالعه اختلاف چشمگیری در تخمین عمق برف نداشته‌اند. بر اساس رابطه (۳) طبق محاسبات انجام شده، در ماه ژانویه در اکثر ایستگاه‌ها، پایگاه ERA5 Land دارای بیش برآوردی و پایگاه MERRA 2 دارای کم برآوردی بوده است. در ماه فوریه در اکثر ایستگاه‌ها، پایگاه MERRA 2 فرا تخمین داشته و پایگاه ERA5 Land دارای الگوی خاص نبوده است. در ماه دسامبر در اکثر ایستگاه‌ها، هر دو پایگاه بازتحلیل در ارزیابی عمق برف در مقایسه با داده‌های مشاهداتی دارای فرا تخمین بوده‌اند.

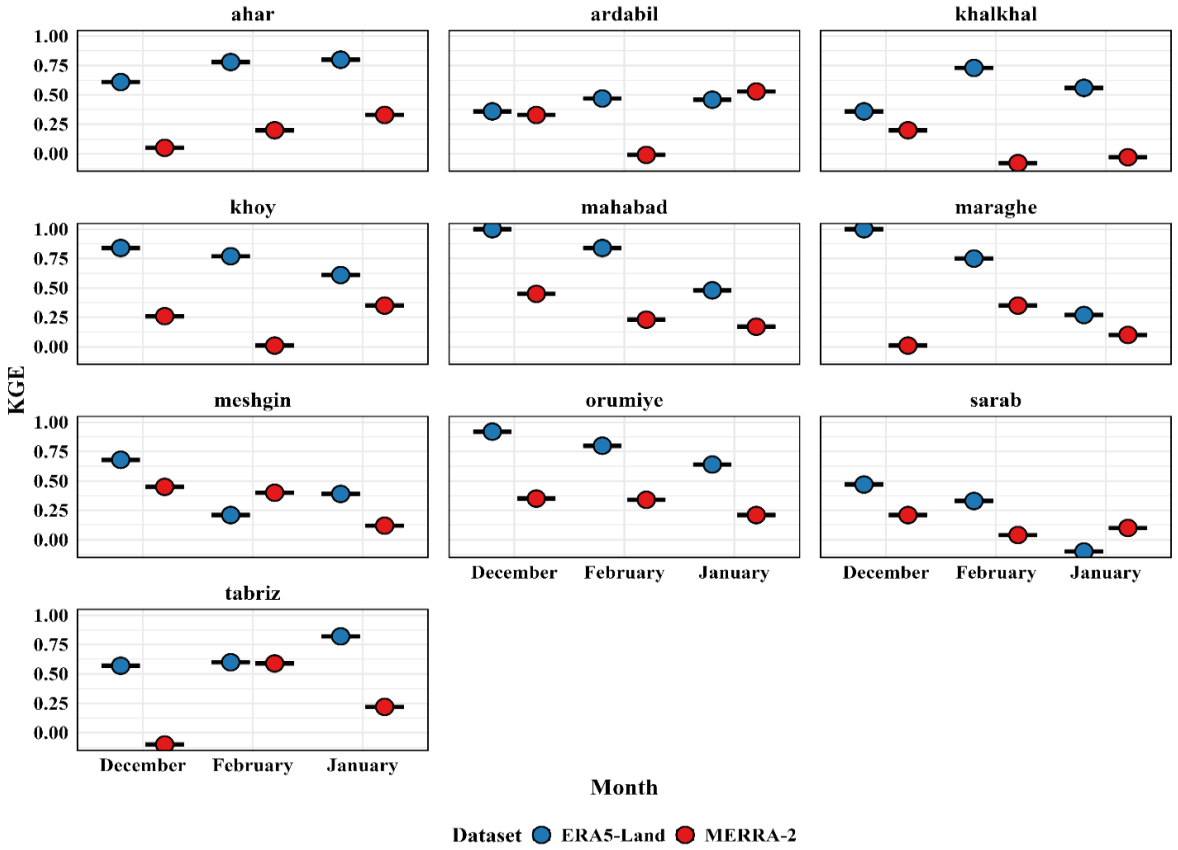
با توجه به نمودار ۶ برای هر ایستگاه در هر ماه از فصل زمستان، با در نظر گرفتن برونداد دو پایگاه بازتحلیل مورد مطالعه در این پژوهش بر اساس سنجه ترکیبی و قابل‌اعتماد کلینگ گوپتا مقایسه صورت گرفت. یافته‌ها در مجموع نشان از برتری پایگاه بازتحلیل ERA5 Land در ارزیابی عمق برف شمال غرب ایران نسبت به داده‌های MERRA 2 داشتند. طبق نمودار فوق در ماه ژانویه، به‌جز دو ایستگاه اردبیل و سراب در بقیه ایستگاه‌ها پایگاه ERA5 Land برتری محسوسی بر MERRA 2 دارد. در ماه فوریه، به‌جز در ایستگاه مشکین‌شهر در بقیه ایستگاه‌ها پایگاه ERA5 Land با مقادیر بالای شاخص کلینگ گوپتا غلبه دارد. در ماه دسامبر، در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه در شمال غرب در این تحقیق با اختلاف، پایگاه ERA5 Land نسبت به پایگاه MERRA 2 عملکرد مناسبی دارد. مقادیر مربوط به شاخص KGE در فصل زمستان در ارزیابی عمق برف، توسط پایگاه MERRA 2 حداکثر به مقدار ۰/۵ رسیده است، درصورتی‌که این سنجه در ارزیابی شناسایی عمق برف توسط پایگاه ERA5 Land تا نزدیکی عدد ۱ نیز در چند ایستگاه رسیده است که نشان از دقت بالای برآورد این پایگاه در ارزیابی عمق برف و همچنین برتری نسبت به داده‌های پایگاه MERRA 2 است.

متغیر جوی برف در مناطق کوهستانی و عرض‌های بالاتر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا تغییرات آن به‌طور مستقیم با وقوع مخاطرات طبیعی و تغییرات هیدرولوژیکی پیوند دارد. در تاریخ ۲۴ دی‌ماه ۱۴۰۲، بارش سنگین برف در استان اردبیل، به‌ویژه در شهر اردبیل، مشکلات جدی برای شهروندان ایجاد کرد؛ ارتفاع برف در برخی مناطق به حدود نیم متر رسید و دمای هوا تا منفی ۱۱ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. این شرایط منجر به مسدود شدن معابر شهری و جاده‌ها، از جمله گردنه حیران و مسیر اردبیل به آستارا شد و صدها خودرو در برف و کولاک گرفتار شدند و پروازهای هوایی لغو گردید. با توجه به مشکلاتی که برای حمل‌ونقل، کشاورزی و افت دما ایجاد می‌کند لازم است مورد بررسی قرار گیرد. ارزیابی بدون داده قابل‌اعتماد نمی‌تواند نتیجه مطلوب و مؤثری به دنبال داشته باشد. به دلیل محدودیت در مناطق کوهستانی در احداث و نگهداری ایستگاه‌های زمینی و کمبود ایستگاه‌های همدیدی، خلأ داده نیز محسوس خواهد شد. یکی از جایگزین‌های مناسب استفاده از داده‌های پایگاه‌های بازتحلیل است که در صورت داشتن تفکیک افقی مناسب و سازگاری با مکان مورد مطالعه می‌تواند پاسخگوی نیاز محققان باشد. نکتهٔ مهم ارزیابی دقت و کارایی این داده‌ها است که قبل از استفاده اجتناب‌ناپذیر است.



شکل ۵- نقشهٔ پهنه‌بندی اختلاف بایاس دو پایگاه داده بازتحلیل در ارزیابی عمق برف در منطقه مورد مطالعه بر اساس مقیاس فصلی در دوره (۲۰۰۴- ۲۰۲۳)، A: ژانویه- B: فوریه- C: دسامبر

Fig. 5. Spatial distribution map of bias differences between two reanalysis datasets in evaluating snow depth over the study area on a seasonal scale during the period 2004–2023: (a) January, (b) February, (c) December



شکل ۶- نمودار جعبه‌ای عملکرد پایگاه‌های بازتحلیل در فصل زمستان، بر اساس شاخص KGE، برای ایستگاه‌های شمال غرب ایران در دوره ۲۰۲۳-۲۰۰۴

Fig. 6. Boxplot of the performance of reanalysis datasets in winter based on the KGE metric for stations in northwestern Iran during the period 2004–2023

نتیجه‌گیری

نتایج نشان دادند که داده‌های خام دو پایگاه بازتحلیل مورد ارزیابی در این تحقیق قابلیت شناسایی عمق برف در شمال غرب ایران را ندارند، به عبارتی انجام مقیاس‌کاهی برای برونداد داده‌های بازتحلیل قبل از استفاده اجتناب‌ناپذیر است. همچنین نتایج، نشان داد که روش تصحیح اریبی نگاشت چارکی (QM) برای متغیر برف قابل‌اطمینان است. بر اساس مطالعهٔ صورت گرفته پایگاه بازتحلیل ERA5 Land توانایی تشخیص عمق برف در شمال غرب ایران را در فصل زمستان دارد و در مقایسه با داده‌های پایگاه بازتحلیل 2 MERRA دقت بالایی دارد. با توجه به مطالعهٔ انجام شده، پایگاه بازتحلیل 2 MERRA به‌جز در برخی ماه‌ها و ایستگاه‌ها توان تشخیص مناسبی را نشان نداد و در صورت استفاده از داده‌های عمق برف در منطقه شمال غرب ایران باید احتیاط کرد. مطالعه حاکی از آن است که پایگاه بازتحلیل ERA5 Land در ایستگاه‌های مهاباد، خوی، اهر، ارومیه و مراغه، بهترین عملکرد را داشته است، به‌طوری‌که مقدار شاخص KGE به عدد ۱ بسیار نزدیک گردید و ضعیف‌ترین عملکرد هر ۲ پایگاه در ایستگاه سراب بوده است. بهترین کارایی از لحاظ زمانی در ماه دسامبر توسط پایگاه بازتحلیل ERA5 Land مشاهده شد و ضعیف‌ترین عملکرد زمانی در ماه فوریه توسط پایگاه بازتحلیل 2 MERRA انجام گرفت. بر اساس مطالعه حاضر، بیشینه مقدار اختلاف بایاس بین دو پایگاه داده بازتحلیل در ارزیابی عمق برف در دوره ۲۰ ساله، در ماه دسامبر ۵۴۲ سانتی‌متر بوده است، بیشینهٔ اختلاف بایاس مکانی دو پایگاه در ماه‌های

دسامبر و فوریه در ایستگاه اهر و در ماه ژانویه در ایستگاه‌های تبریز و مراغه مشاهده شد. کمینهٔ اختلاف بایاس مکانی بین دو پایگاه داده بازتحلیل در ماه ژانویه در ایستگاه اردبیل رؤیت شد. مطالعهٔ حاضر نشان داد که هرچه از غرب منطقه شمال غرب ایران به سمت شرق آن حرکت کنیم از میزان دقت داده‌های عمق برف پایگاه بازتحلیل ERA5 Land کاسته می‌شود (افزایش عدم قطعیت). نتایج تحقیق حاضر با یافته‌های کیاو و همکاران (Qiao et al., 2023) و تاسزارک و همکاران (Taszarek et al., 2021) از لحاظ تأیید عملکرد مناسب ERA5 در مقایسه با MERRA2 در مناطق مرتفع همسو است. نتایج این مطالعه با یافته‌های تحقیق مجیدی کرهرودی و همکاران (Majidi Karhroudi et al., 2024) از بابت، با افزایش ارتفاع در شمال غرب ایران میزان عدم قطعیت در برآورد میزان عمق برف میانگین حاصل از داده‌های ERA5 افزایش می‌یابد هم‌راستا است. نتایج این پژوهش در زمینهٔ این که داده‌های ERA5 در تخمین میزان عمق برف در شمال غرب ایران نسبت به داده‌های مشاهداتی دارای فروتخمین هستند و میزان عدم قطعیت در برآورد میزان عمق برف میانگین حاصل از داده‌های ERA5 با افزایش عرض جغرافیایی بیش‌تر می‌گردد؛ با نتایج مطالعهٔ مجیدی کرهرودی و همکاران (Majidi Karhroudi et al., 2024) همسو نیست. نتایج این پژوهش علاوه بر ارائه تصویری روشن از قابلیت داده‌های ERA5-Land و MERRA-2 در برآورد عمق برف زمستانی شمال‌غرب ایران، نوآوری‌های قابل‌توجهی را نیز به همراه داشت. نخست آن‌که ارزیابی داده‌ها به‌صورت هم‌زمان و در مقیاس فصلی زمستان برای یک بازه زمانی نسبتاً طولانی (۲۰۰۴ تا ۲۰۲۳) انجام گرفت که در مطالعات مشابه کمتر مورد توجه قرار گرفته و معمولاً تعداد ایستگاه‌های مورد بررسی در آن‌ها کمتر است. دوم، استفاده از روش آماری Quantile Mapping به‌صورت ماهانه و ایستگاه‌محور برای مقیاس‌کاهی و تصحیح داده‌های بازتحلیل، دقت نتایج را به‌طور چشمگیری افزایش داد. سوم، بهره‌گیری ترکیبی از شاخص‌های KGE، PBIAS و نمودار تیلور امکان ارزیابی جامع‌تری نسبت به رویکردهای تک‌معیار فراهم نمود. در نهایت، به‌کارگیری نمودارهای جعبه‌ای فصلی برای مقایسه عملکرد مدل‌ها در ایستگاه‌های مختلف، دیدگاه تازه‌ای نسبت به ناهمگنی مکانی داده‌های بازتحلیل در مناطق کوهستانی ایران ارائه کرد.

سپاسگزاری

این مقاله با حمایت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی از طرح پژوهشی با شماره قرارداد ۱۴۰۴/د/۹/۳۱۶۰ استخراج گردیده است لذا نویسندگان، از پشتیبانی معاونت محترم پژوهشی و دانشکده علوم اجتماعی دانشگاه محقق اردبیلی، کمال تشکر را دارند. همچنین از داوران محترم به خاطر ارائه نکته‌نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

References

Asefi, M., & Fathzadeh, A. (2022). Simulating spatial distribution of snow depth using artificial intelligence and linear regression based on feature reduction (Case study: Chalgerd watershed). *Water and Soil Management and Modelling*, *3*(4), 29-43. [In Persian] https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11560.1141

Asefi, M., Fathzadeh, A., Taghizadeh-Mehrjardi, R., & Zare Chahooki, M. A. (2023). Snow depth estimating as one of the consequences of climate change using the combined least squares model approach of support vector machine and genetic algorithm. *Climate Change Research*, *3*(12), 21-36. [In Persian] https://doi.org/10.30488/ccr.2022.369343.1105

Baba, M. W., Boudhar, A., Gascoin, S., Hanich, L., Marchane, A., & Chehbouni, A. (2021). Assessment of MERRA-2 and ERA5 to model the snow water equivalent in the high atlas (1981–2019). *Water*, *13*(7), 890. https://doi.org/10.3390/w13070890

Bahrami, M., Fathzadeh, A., Zaree Chahooki, M. A., & Taghizadeh Mehrjerdi, R. (2016). Scale Effect Geomorphometric Parameters of Spatial Pattern of Snow Depth. *Journal of Hydrogeomorphology*, *3*(6), 95-113. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23833254.1395.3.6.6.0

Daloz, A. S., Mateling, M., L'Ecuyer, T., Kulie, M., Wood, N. B., Durand, M., ... & Dimri, A. P. (2020). How much snow falls in the world's mountains? A first look at mountain snowfall estimates in A-train observations and reanalyses. *The Cryosphere*, *14*(9), 3195–3207. https://doi.org/10.5194/tc-14-3195-2020

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, *377*(1–2), 80–91. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003

Haji Mohammadi, H., & Hajivand Paydari, S. (2023). Evaluation of ECMWF Center Data in Monitoring and Forecasting Dust Storms in Southwestern Iran (Case Study: Khuzestan Plain). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *12*(1), 155-170. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75342.1178

Hamidianpour, M., & Shoja, F. (2022). *An introduction to methods and techniques of climate and climate change modeling* (1st ed.). University of Sistan and Baluchestan Press. [In Persian]

He, L., Xue, B., Hui, F., Xu, S., Chen, Z., & Cheng, X. (2024). Toward daily snow depth estimation on arctic sea ice during the whole winter season from passive microwave radiometer data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62, 1-15. https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3358340

Khoshakhlagh, F., Haji Mohammadi, H., & Koshky, H. (2024). Investigating the Atmospheric Structure of the Von Phenomenon at the Time of Forest Fires in Northern Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(1), 195-216. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76403.1219

Knoben, W. J., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, *23*(10), 4323-4331. https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019

Lanzante, J. R., Adams-Smith, D., Dixon, K. W., Nath, M., & Whitlock, C. E. (2020). Evaluation of some distributional downscaling methods as applied to daily maximum temperature with emphasis on extremes. *International Journal of Climatology*, *40*(3), 1571-1585. https://doi.org/10.1002/joc.6288

Li, Q., Yang, T., & Li, L. (2022). Evaluation of snow depth and snow cover represented by multiple datasets over the Tianshan Mountains: Remote sensing, reanalysis, and simulation. *International Journal of Climatology*, *42*(8), 4223-4239. https://doi.org/10.1002/joc.7459

Majidi Karhroudi, F. S., Gharaylou, M., & Sabetghadam, S. S. (2024). Evaluation of the performance of the ERA5 and MERRA2 reanalysis datasets in estimating snow depth over Northwestern Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, *50*(1), 251-263. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.358474.1007521

Majidi Karhroudi, F., Sabetghadam, S., & Gharaylou, M. (2024). Application of MERRA-2 to investigate changes in snow depth in high mountains of Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, *17*(5), 79-90. [In Persian] https://doi.org/10.30499/ijg.2023.387662.1502

Meier, W. N., & Stroeve, J. (2022). An updated assessment of the changing Arctic sea ice cover. *Oceanography*, *35*(3/4), 10-19. https://doi.org/10.5670/oceanog.2022.114

Mirmousavi, S. H., & Heidari Monfared, Z. (2024). Analysis of Spatio-Temporal Variations of the Average Snow Cover During the Cold Seasons in the Northwest of Iran. *Nivar*, *48*(124-125), 84-104. [In Persian] https://doi.org/10.30467/nivar.2024.437745.1279

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, *50*(3), 885–900. https://doi.org/10.13031/2013.23153

Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R., & Martius, O. (2021). River runoff in Switzerland in a changing climate–runoff regime changes and their time of emergence. *Hydrology and Earth System Sciences*, *25*(6), 3071-3086. https://doi.org/10.5194/hess-25-3071-2021

Naghizadeh, H., Rasouly, A. A., Sari Sarraf, B., Jahanbakhsh, S., & Babaian, I. (2019). The Variability of the Snow Depth in the Northern Zone of Iran is based on the ECMWF Database of the ERA Interim Edition. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *8*(2), 211-229. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.78609

Panofsky, H. A., & Brier, G. W. (1968). *Some applications of statistics to meteorology*. Mineral Industries Extension Services, College of Mineral Industries, Pennsylvania State University. https://cir.nii.ac.jp/crid/1970304959946981407

Qiao, Y., Ji, D., Shang, H., Xu, J., Xu, R., & Shi, C. (2023). The Fusion of ERA5 and MERRA-2 Atmospheric Temperature Profiles with Enhanced Spatial Resolution and Accuracy. *Remote Sensing*, *15*(14), 3592. https://doi.org/10.3390/rs15143592

Shukla, P. R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., Van Diemen, R., McCollum, D., ... & Malley, J. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. *Contribution of working group III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, *10*, 9781009157926. https://doi.org/10.1017/9781009157926

Taszarek, M., Pilguj, N., Allen, J. T., Gensini, V., Brooks, H. E., & Szuster, P. (2021). Comparison of convective parameters derived from ERA5 and MERRA-2 with rawinsonde data over Europe and North America. *Journal of Climate*, *34*(8), 3211-3237. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0484.1

Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *106*(D7), 7183–7192. https://doi.org/10.1029/2000JD900719

Xiao, L., Che, T., & Dai, L. (2020). Evaluation of remote sensing and reanalysis snow depth datasets over the northern hemisphere during 1980–2016. *Remote Sensing*, *12*(19), 3253. https://doi.org/10.3390/rs12193253

Zhao, L., Chen, J., Shahzad, M., Xia, M., & Lin, H. (2024). MFPANet: Multi-Scale Feature Perception and Aggregation Network for High-Resolution Snow Depth Estimation. *Remote Sensing*, *16*(12), 2087. https://doi.org/10.3390/rs16122087

Vol. 15, No. 1, Spring 2026, p. 153-169 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94634.1598 OPEN ACCESS

Assessment of the Relationship between Jet Stream Patterns and Cold Temperature Extremes (CTEs) in Iran

Nahid Mohammadi [1], Firouz Mojarrad [1]*, & Jafar Masompour Samakoosh [1]

[1] Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 03 August 2025

Revised: 23 October 2025

Accepted: 25 October 2025

Available Online:

25 October 2025

Keywords:

Cold Temperature Extremes (CTEs)

Jet Stream

Self-Organizing Maps (SOM)

Atmospheric Circulation Patterns

Iran

ABSTRACT

Cold Temperature Extremes (CTEs), in addition to impacting the energy, agricultural, and environmental sectors, pose significant risks to biological systems and human health. Accordingly, understanding this hazard and the atmospheric mechanisms that contribute to its occurrence is considered essential for deepening conceptual insight and improving forecasting accuracy. Upper-tropospheric jet streams are among the principal drivers and modulators of CTEs. To investigate this relationship, temperature records from 30 stations and 300 hPa wind reanalysis data from the ECMWF database spanning a 32-year period were utilized. The gridded jet stream data were initially clustered using the Self-Organizing Map (SOM) neural network technique. Subsequently, CTE frequency within each cluster was quantified, and the corresponding synoptic patterns were analyzed. The study's findings revealed that the mean frequency of CTEs has declined in parallel with the rise in the country's average air temperature between 1992 and 2023. The highest CTE frequencies occurred under conditions dominated by strong jet streams over the region, typically associated with the confluence of the polar front and subtropical jet streams during the colder months. In contrast, a smaller proportion of CTE events more prevalent in autumn and spring was linked to weaker upper-level flow, as indicated by the absence of pronounced jet stream activity at the 300 hPa level.

* Corresponding author: Firouz Mojarrad E-mail address: f_mojarrad@yahoo.com

How to cite this article: Mohammadi, N., Mojarrad, F., & Masompour Samakoosh, J. (2026). Assessment of the Relationship between Jet Stream Patterns and Cold Temperature Extremes (CTEs) in Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 15*(1), 153-169. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.94634.1598

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Cold Temperature Extremes (CTEs) can adversely affect public health, agriculture, and the environment. Investigating the meteorological drivers of CTEs and analyzing the atmospheric patterns that trigger them enhances understanding, improves forecasting, and promotes awareness to help mitigate associated impacts. The 300 hPa level is a key layer for analyzing large-scale atmospheric flows and phenomena such as jet streams and planetary waves. Previous studies have examined patterns in the mid- and lower troposphere during CTE events. For example, the role of deep troughs and ridges at the 500 hPa level, along with temperature advection, has been explored in relation to the persistence of cold spells. The occurrence of cold anomalies and their relationship with atmospheric blocking patterns have also been studied. Eastward shifts in blocking systems can displace cold anomalies toward downstream regions, resulting in cold winter conditions. Analysis of jet streams and upper-level circulation is crucial for understanding meteorological phenomena near the Earth's surface. The two primary jet streams in the Northern Hemisphere the polar front jet stream and the subtropical jet stream play a significant role in this context. Increased curvature and intensification of these jet streams can lead to the advection of cold air toward lower latitudes, contributing to the occurrence of CTEs. The main objective of this study is to investigate the relationship between jet stream patterns and CTEs in the upper atmosphere over Iran.

Material and Methods

In this study, daily temperature data from 30 stations operated by the Iranian Meteorological Organization were analyzed over a 32-year period (1992–2023) to identify CTEs. Days on which the average daily temperature at a station fell below the 10th percentile were classified as CTE days. Synoptic maps of the upper atmosphere were examined using daily wind direction and speed data at the 200, 300, and 500 hPa levels, with a horizontal resolution of 0.1 degrees, obtained from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). To identify dominant wind patterns, a Self-Organizing Map (SOM) neural network was applied using MATLAB's built-in functions. SOM is an unsupervised learning algorithm designed to detect and visualize the distribution of multidimensional data. It is typically implemented by constructing a two-dimensional grid of nodes that represent clusters within the dataset.

Results and Discussion

The lowest annual average temperature in Iran during the study period was approximately 14.6°C, recorded in 1992 a year that also experienced the highest number of CTE events. The trend line of average temperatures over the 32-year period indicates a warming rate of 0.05°C per year.

Daily horizontal wind data at the 300 hPa level, spanning the same 32-year period, were clustered into six groups using the Self Organizing Map (SOM) method. Based on the clustering results and the frequency of CTE events, Pattern 1 accounts for approximately 45% of the average CTE frequency across stations in Iran. This pattern is characterized by a strong jet stream at the 300 hPa level, with wind speeds reaching 40 $m \cdot s^{-1}$ over the southern half of the country, positioning Iran within both the cold inlet and outlet zones of the jet stream. A comparison of wind flow at the 200, 300, and 500 hPa levels reveals the influence of both the polar front and subtropical jet streams on CTE events. Pattern 1 occurred most frequently in January, February, and March, with its highest annual frequency observed in 2019. Pattern 4 also played a significant role, accounting for about 36% of CTE occurrences. It was present in all months except June, July, August, and September. In this pattern, the 300 hPa jet stream extended across the entire country, with its core centered over the central and southern regions. In both Patterns 1 and 4, the presence of strong wind flow at all three levels suggests that the merging of the polar front and subtropical jet streams created favorable conditions for cold air advection into Iran. Patterns 2 and 5 ranked third and fourth, respectively, in terms of CTE frequency. In Pattern 2, no strong jet stream was observed at any of the three levels, and the prevailing wind direction was westerly. These conditions indicate a lack of significant kinetic energy in the upper troposphere. This pattern was most frequent in March, April, and

May. Pattern 5 accounted for approximately 5% of CTE events and occurred predominantly in May, June, September, and October transitional months between cold and warm seasons. In this pattern, a jet stream at the 200 hPa level, with maximum speeds of 35–40 $m \cdot s^{-1}$, extended in a narrow band from Iraq to northeastern Iran. Patterns 3 and 6 did not play a significant role in CTE occurrence. Wind flow in the upper troposphere within these clusters clearly exhibited anticyclonic circulation associated with the dominance of the subtropical high-pressure system.

Conclusion

Based on the results of the statistical analysis, the mean frequency of CTEs has declined in parallel with the rise in the country's average air temperature between 1992 and 2023. The analysis of clustering patterns and CTE event frequencies consistent with previous studies indicates that jet streams play a significant role in the occurrence of CTEs in Iran. Wind flow patterns at various atmospheric levels clearly demonstrate the influence of both the polar front and subtropical jet streams on these events. Among the six identified clusters, strong and persistent jet streams are defining features of Clusters 1 and 4, both of which have played a major role in CTE formation. Cluster 1 occurred most frequently during the cold months, while Cluster 4 was observed during both cold and temperate months. In these two patterns, the polar front jet stream is responsible for advecting cold air into Iran. In Cluster 2, strong jet streams were absent in the upper troposphere, and the prevailing currents were predominantly westerly. This pattern was more common in late winter and early spring. CTE events in Cluster 5 primarily occurred during the equinox months, when relatively weak jet streams were present over the northern half of the country. The frequency of CTE events in Clusters 3 and 6 was nearly zero across stations, due to the dominance of subtropical high-pressure and the absence of favorable conditions for CTE development.

جلد ۱۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۱۶۹-۱۵۳ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

دسترسی آزاد

DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94634.1598

مقاله پژوهشی

بررسی ارتباط بین الگوهای رودباد و فرین‌های دمایی سرد در ایران

ناهید محمدی[۱]، فیروز مجرد[۱*]، جعفر معصوم‌پور سماکوش[۱]

[۱] گروه جغرافیا، دانشکدهٔ ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳

کلمات کلیدی:

فرین دمایی سرد (CTEs)

رودباد

نقشهٔ خودسامان‌دهنده (SOM)

الگوهای گردش جو

ایران

چکیده

فرین‌های دمایی سرد علاوه بر آسیب به بخش‌های انرژی، کشاورزی و محیط زیست، می‌تواند زندگی جانداران را به‌خطر بیندازد. از این‌رو بررسی و شناخت این مخاطره و الگوهای جوی به‌وجودآوردندهٔ آن به‌منظور درک بهتر و پیش‌بینی مناسب ضروری به نظر می‌رسد. رودبادهای تراز بالایی وردسپهر از عوامل مهم کنترل‌کننده و محرک دماهای فرین سطح زمین هستند. به‌منظور بررسی ارتباط بین فرین‌های سرد و رودبادهای تراز بالایی وردسپهر، از داده‌های دمای ۳۰ ایستگاه هواشناسی و داده‌های بازتحلیل باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال پایگاه ECMWF در بازهٔ زمانی ۳۲ساله، استفاده شده است. ابتدا داده‌های شبکه‌ای رودباد با به‌کارگیری روش شبکهٔ عصبی خودسامان-دهنده (SOM) خوشه‌بندی شد. سپس فراوانی رویدادهای فرین سردِ هر دسته، محاسبه و الگوهای سینوپتیکی مربوطه تحلیل گردید. نتایج تحقیق نشان داد با توجه به روند افزایشی میانگین دمای هوای کشور بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۳، میانگین فراوانی رویدادهای فرین سرد کاهش یافته است. بیشترین فراوانی فرین‌های سرد در شرایطی رخ داده است که رودبادهای قوی در کشور حاکمیت داشته‌اند. این رودبادها حاصل ادغام دو رودباد جبههٔ قطبی و جنب‌حاره بوده و غالباً در ماه‌های سرد سال اتفاق افتاده‌اند. در مورد درصد کمی از رویدادهای فرین سرد که در فصل‌های پاییز و بهار پرتکرار بوده‌اند، الگوهای تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال نشان‌دهندهٔ نبود رودباد قوی می‌باشد.

مقدمه

دمای هوا؛ ویژگی مهم کرهٔ زمین و عاملی تعیین‌کننده در زندگی موجودات است. تغییرات دمایی می‌تواند آثار زیان‌باری بر جنبه‌های مختلف زندگی مانند سلامتی، کشاورزی (Zenozi Alamdari, Sobhani, Islahi & Mohammadi, 2025) و محیط زیست (Eskandari Damaneh, Gholami, Mahdavi, Khoorani & Li , 2019) داشته باشد. بررسی عوامل هواشناسی در رویدادهای فرین سرد و تحلیل الگوهای جوی محرک آن، علاوه بر شناخت بهتر، سبب بهبود پیش‌بینی پدیدهٔ مذکور و آگاهی‌بخشی برای کاهش خسارات خواهد شد. رخداد فرین سرد، به استقرار هوای سرد در یک منطقهٔ مشخص اشاره دارد که

* نویسندهٔ مسئول: فیروز مجرد
E-mail: f_mojarrad@yahoo.com

معمولاً تحت تأثیر آرایش ویژه‌ای از الگوهای لایه‌های مختلف جو از جمله در ترازهای میانی و بالایی وردسپهر رخ می‌دهد (Asakereh & Shahbaee Kotenaee, 2018). تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال یکی از مهم‌ترین سطوح برای تحلیل جریان‌های جوی بزرگ مقیاس و پدیده‌هایی همچون رودباد و امواج سیاره‌ای است. در مطالعات پیشین، اغلب الگوهای لایه‌های پایینی و میانی جو هنگام رخداد فرین‌های سرد بررسی شده است. تول و مارتیوس (Tuel & Martius, 2024) نشان دادند که دوره‌های گرم و سرد در نیمکرهٔ شمالی با الگوهای جوی بزرگ مقیاس مانند بندال جوی[1] و امواج راسبی[2] مرتبط هستند و ناوه‌های عمیق و پشته‌ها در تراز میانی جو (۵۰۰ هکتوپاسکال) همراه با فرارفت دمایی نقشی کلیدی در ماندگاری دوره‌های سرد ایفا می‌کنند. آدامز و همکاران (Adams, Lee, Smith & Sheridan, 2021) با استفاده از روش نقشه‌های خودسامان‌دهنده[3] (SOM) بر روی ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال و فشار تراز دریا نشان دادند که ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال نسبت به فشار تراز دریا ارتباط قوی‌تری با فرین‌های دمایی در آمریکای شمالی دارند. در مطالعهٔ دیگری نایگارد و همکاران (Nygard, Papritz, Naakka & Vihma, 2023) با استفاده از نقشه‌های خودسامان‌دهنده و شناسایی شش الگوی شاخص ناهنجاری دمایی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال دریافتند که موقعیت ناهنجاری‌های سرد به‌طور مستقیم با موقعیت الگوهای بندالی جوی مرتبط است؛ به‌طوری‌که جابه‌جایی شرق‌سوی سیستم بندالی، ناهنجاری سرد را نیز به سمت شرق منتقل می‌کند و سبب رویداد هوای سرد زمستانی در اروپا می‌شود.

تحلیل رودباد و جریانات جوی ترازهای بالایی وردسپهر در بررسی پدیده‌های هواشناسی مجاور سطح زمین اهمیت زیادی دارد. رودباد، جریان‌های سریع و باریکی از هوا (غالباً با سرعت بیش از ۳۰ متربرثانیه) هستند که نقش مهمی در تغییرات دما ایفا می‌کنند (Shaw & Miyawaki, 2023). دو رودباد اصلی و شناخته‌شده در نیمکرهٔ شمالی عبارتند از: رودباد جبههٔ قطبی و رودباد جنب‌حاره‌ای (Saligheh, 2017). این دو رودباد، گسترهٔ بزرگی را در نیمکرهٔ شمالی در برگرفته و از اجزاء اصلی گردش عمومی جو هستند. حرکت‌های عمودی متفاوت در دو توده هوای سرد قطبی و گرم استوایی عرض‌های میانی و تضاد دمایی شدید بین آن‌ها سبب ایجاد رودباد جبههٔ قطبی می‌شود که در منطقهٔ برون‌حاره نقش مهمی در ایجاد و تقویت سیکلون‌ها دارند (Kavyani & Alijani, 2019). همچنین وجود رودباد و جریان سریع هوا سبب انتقال انرژی و تکانه در جو می‌شود (Trevisiol, Gilli & Faggian, 2022; Stendel, Francis, White, Williams & Woollings, 2021). جریان مداری رودباد جبههٔ قطبی، هوای سرد را در مجاورت قطب نگه می‌دارد. مسیر رودباد جبههٔ قطبی، همواره مداری نیست و همراه با امواج راسبی انحناء پیدا می‌کند. امواج راسبی بیانگر حالت کلی شکل امواج جوی در نیمکرهٔ شمالی است که غالباً در نواحی برون‌حاره جریان دارد. این امواج با شکل‌گیری، تقویت و یا تضعیف ناوه‌ها و پشته‌ها، شرایط استقرار هوای سرد و گرم را در یک منطقه فراهم می‌کنند (Jimenez-Esteve & Domeisen, 2022; Liu, Xu, Peng & Wu, 2018). افزایش انحناء و تقویت رودباد می‌تواند منجر به فرارفت هوای سرد به عرض‌های پایین‌تر شود (Kornhuber et al., 2020). وجود ناوه‌های عمیق که با هوای سرد همراه هستند، می‌تواند هوای سرد قطبی را به عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر هدایت کند و سبب وقوع فرین‌های سرد، شود (Asakereh & Shahbaee Kotenaee, 2018). چنانچه این ناوه به شکل یک مرکز کم‌ارتفاعِ بسته‌شده از امواج اصلی جدا و به عرض‌های پایین‌تر منتقل شود، می‌تواند در مناطق وسیعی هوای سرد را به دام انداخته و به کاهش شدید دما در سطح زمین منجر شود (Sepadeh, Salahi, Alijani & Zeynali, 2021). از طرفی پشته‌های قوی در کنار ناوه‌ها می‌توانند تشکیل یک سامانهٔ بندالی دهند و هوای سرد را در ناحیه‌ای ماندگار کنند (Asakereh & Shahbaee Kotenaee, 2018). در یکی از انواع سامانه‌های بندالی، رودباد جبههٔ قطبی، دچار انسداد شده و مسیر حرکتش به شکل یک حلقهٔ ثابت (بندال امگا) در می‌آید که سبب ماندگاری هوای سرد قطبی برای مدت طولانی در یک منطقه می‌شود (Pazhoh, 2020).

چند نمونه از مطالعاتی که به بررسی ارتباط رودباد و امواج راسبی با فرین‌های دمایی پرداخته‌اند، در ادامه بررسی می‌شود. پارک و همکاران (Park, Hong & Park, 2020) با خوشه‌بندی الگوهای ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال

1- Blocking Pattern
2- Rossby Waves
3- Self Organizing Map (SOM)

دریافتند که قطار امواج راسبی سبب رویدادهای فرین سرد کوتاه‌مدت در کرۀجنوبی می‌شود. راتنا و همکاران (Ratna, Osborn, Joshi & Luterbacher, 2020) امواج راسبی را با استفاده از ناهنجاری باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال در ناحیۀ اقیانوس اطلس شمالی بررسی کردند و دریافتند که قطار امواج راسبی شرق‌سو سبب استقرار پرفشار و در نتیجه، ناهنجاری گرم و خشک در شرق چین و ژاپن می‌شود. در مطالعۀ لیو و همکاران (Liu et al., 2018) موج راسبی رانده‌شده از باد غربی در نزدیکی دریای مدیترانه مسئول فرین دمایی زمستانی در چین شناخته شده است. پرز و همکاران (Perez et al., 2021) با بررسی موقعیت رودباد، دلیل اصلی رخداد موج گرم دریایی شمال غرب اطلس را موقعیت عرض جغرافیایی رودباد و فرارفت اقیانوسی ناشی از جریان گلف استریم دانستند. ژو و همکاران (Zhou et al., 2022) با استفاده از توابع تجربی متعامد[1] (EOF) بر روی داده‌های باد مداری، تغییرات رودباد جنب‌حاره در شرق آسیا را در رخداد فرین گرم همراه با رطوبت بالا مؤثر تشخیص دادند. در پژوهش خیمنز-استیو و دومایسن (Jimenez-Esteve & Domeisen, 2022) معلوم شد که رشته‌کوه‌های با ارتفاع بیش از شش کیلومتر به‌واسطۀ تغییر در جریان رودباد و در نتیجه فرارفت افقی دما در پراکندگی امواج گرم عرض‌های میانی تأثیر دارند. دی‌کاپو و همکاران (Di capua et al., 2021) با بررسی ناهنجاری سرعت باد و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال نقش قطار امواج راسبی را در رویداد موج گرما در روسیه و سیل در پاکستان که به‌طور همزمان رخ دادند، بررسی کردند. روسی و همکاران (Rousi, Kornhuber, Beobide-Arsuaga, Luo & Coumou, 2022) وجود دو رودباد جبهۀ قطبی و جنب‌حاره‌ای را در اوراسیا در افزایش رویدادهای موج گرما در اروپا مؤثر دانستند. همچنین احسان و همکاران (Ehsan et al., 2020) نشان دادند که تضعیف رودباد غربی در تراز بالایی وردسپهر بر دمای سطح زمین در خاورمیانه تأثیرگذار است.

در مطالعات مربوط به فرین‌های سرد، نقش ویژگی‌های ترازهای بالایی وردسپهر کمتر مورد توجه محققان بوده است. به‌منظور بررسی جامع شرایط جوی در هنگام رخدادهای فرین سرد در ایران، نیاز به تحلیل سینوپتیکی و دینامیکی نقش رودباد و الگوهای جو بالا کاملاً مشهود است. از این‌رو مطالعۀ رودباد در شناخت و بهبود پیش‌بینی فرین‌های سرد ضروری به نظر می‌رسد. هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی ارتباط رخدادهای فرین سرد با رودباد و الگوهای ترازهای بالایی جو در ایران است.

منطقۀ مورد مطالعه

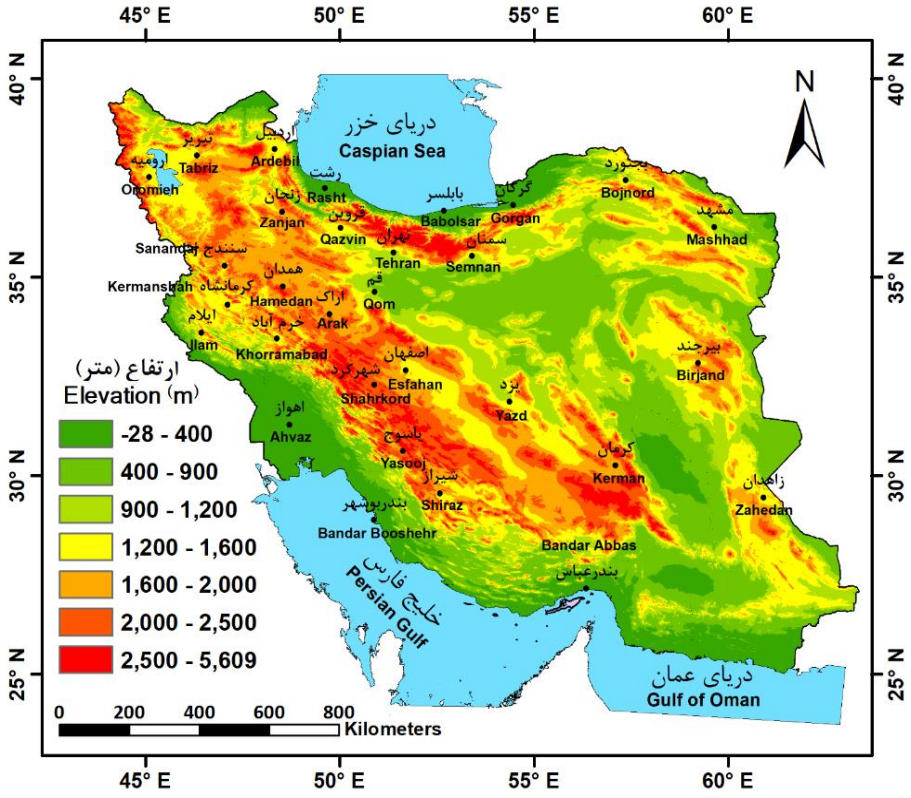
در پژوهش حاضر منطقۀ مورد مطالعه کشور ایران است که مابین عرض‌های جغرافیایی ′۲۵°۰۳ تا ′۳۹°۴۷ شمالی و طول‌های جغرافیایی ′۴۴°۰۲ تا ′۶۳°۲۰ شرقی واقع شده است (شکل ۱). ایران کشوری با ویژگی‌های آب‌وهوایی متنوع است که طیف وسیع دمایی در سطح آن رخ می‌دهد. به‌طور میانگین در بازۀ زمانی ۳۲ سالۀ مورد مطالعه، اردبیل با میانگین دمای ۱۰ درجه سردترین و بندرعباس، اهواز و بوشهر با میانگین دمای بیش از ۲۵ درجه گرم‌ترین ایستگاه‌های مورد بررسی بودند.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش به‌منظور بررسی سازوکارهای همدیدی جو بالا و اثر آن بر رخدادهای فرین سرد، با به‌کارگیری رویکرد گردشی به محیطی، ابتدا الگوهای رودباد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال با روش نقشه‌های خودسامان‌دهنده (SOM) خوشه‌بندی و سپس ارتباط هر خوشه با فرین‌های سرد بررسی شده است. بررسی نقشه‌های سینوپتیکی جو بالا با به‌کارگیری داده‌های روزانۀ سمت و سرعت باد در ترازهای ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال با قدرت تفکیک افقی ۰/۱ درجه از «مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت وضع هوا»[2] (ECMWF) به انجام رسیده است. همچنین برای شناسایی رویدادهای فرین سرد، از داده‌های میانگین دمای روزانۀ ۳۰ ایستگاه سازمان هواشناسی کشور (شکل ۱) در یک بازۀ زمانی ۳۲ ساله (۱۹۹۲ تا ۲۰۲۳) استفاده شده است.

با توجه به ویژگی‌های دمایی متفاوت ایستگاه‌های مورد مطالعه در ایران، روزهایی که دمای میانگین روزانۀ هر ایستگاه از صدک دهم کمتر بوده به عنوان فرین دمایی سرد در ایستگاه مورد نظر انتخاب شده است. در واقع شاخص دمای کمتر از صدک دهم، که به‌طور مجزا برای هر ایستگاه محاسبه شده است، از بین کل روزهای مورد بررسی (بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۳) ده درصد از روزهایی را نشان می‌دهد که کم‌ترین دمای روزانه را داشته‌اند.

1- Empirical Orthogonal Functions (EOF)
2- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)



شکل ۱- پراکندگی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در ایران

Fig. 1. Spatial distribution of weather stations of Iran

همچنین برای شناخت الگوهای غالب رودباد در بازهٔ زمانی ۳۲ ساله، از شبکهٔ عصبی نقشه‌های خودسامان‌دهنده (SOM) با استفاده از توابع تعبیه شده در بستر برنامهٔ متلب[1] استفاده شده است. نقشهٔ خودسامان‌دهنده (SOM) یک الگوریتم شبکهٔ عصبی است که از روش‌های یادگیری نظارت نشده استفاده می‌کند. این الگوریتم که برای تعیین و نمایش تابع توزیع یک مجموعه دادهٔ چند بعدی استفاده می‌شود، معمولاً با ایجاد یک شبکهٔ دوبعدی از گره‌ها اجرا می‌شود (Sheridan & Lee, 2011). هر گره با یک بردار وزن مشخص می‌شود که نمایندهٔ بخشی از داده‌های ورودی است. این بردارها در طول فرآیند آموزش مدل به‌تدریج به‌سمت داده‌های مشابه حرکت می‌کنند. نتایج شبکهٔ نهایی به این صورت است که داده‌هایی که شباهت بیشتری دارند، در یک گروه یا گره قرار می‌گیرند. در این مدل خوشهٔ اول و خوشهٔ آخر بیشترین تفاوت را با هم دارند و بین آن‌ها سایر دسته‌ها به‌طور پیوسته قرار می‌گیرند (Hewitson & Crane, 2002). داده‌های سرعت باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال با تفکیک زمانی روزانه در بازهٔ زمانی ۳۲ ساله در قالب ماتریس ورودی به شبکهٔ عصبی یادشده معرفی شد. برای ارائهٔ نتایج بهتر، پیش از انجام این الگوریتم، داده‌های باد با رابطهٔ (۱) نرمال شدند.

$$v_i = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^{n} v_i^2} \qquad (۱)$$

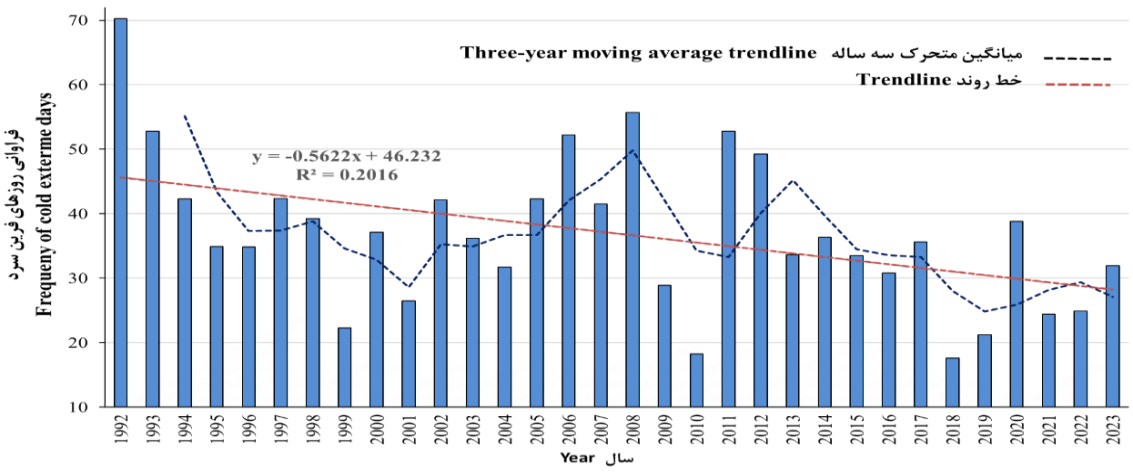
که در آن v_i سرعت باد افقی تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال در نقطهٔ شبکهٔ i ام و n تعداد داده‌های سری زمانی باد افقی در این نقطهٔ شبکه یا به عبارت دیگر تعداد روزهای مورد بررسی است. در این پژوهش از شبکه، با ابعاد ۳×۲ استفاده شده است. نتایج این شبکه، در قالب شش الگو، نمایش مختصر و مفیدی را از سرعت باد در دورهٔ مورد بررسی ارائه می‌دهد. به منظور بررسی تأثیر رودباد بر فرین‌های سرد، فراوانی این رویدادها در ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی برای هریک از خوشه‌ها محاسبه شد. این مقدار نشان‌دهندهٔ اهمیت الگوی رودباد در هر خوشه در ایجاد رویدادهای فرین سرد است.

1- MATLAB

در نهایت الگوهای جوی به‌وجودآورندهٔ رخدادهای فرین سرد در سطح کشور بررسی و تحلیل گردید. به منظور تحلیل جامع وضعیت رودباد در ترازهای بالایی، افزون بر نقشهٔ باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال، نقشه‌های باد ترازهای ۲۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز برای دسته‌های حاصل از خوشه‌بندی اصلی رسم شده است. مطالعهٔ وضعیت باد در این سه تراز بالایی وردسپهر درک بهتری از وضعیت رودباد ارائه می‌دهد. همچنین با توجه به این‌که رودباد جنب‌حاره نسبت به رودباد جبههٔ قطبی در ارتفاع بالاتری جریان دارد، مقایسهٔ الگوهای باد در این سه سطح باعث تشخیص رودباد جنب‌حاره از رودباد جبههٔ قطبی می‌شود.

نتایج و بحث

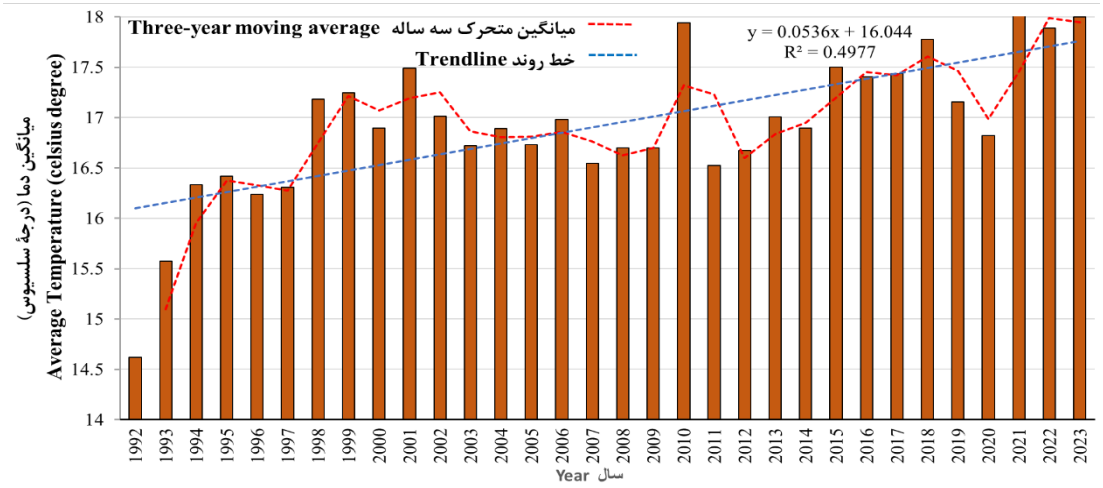
میانگین فراوانی سالانهٔ فرین‌های سرد در ایستگاه‌های مورد مطالعه در ایران روند کاهشی داشته است. این روند به‌ویژه در سالیان اخیر نمایان‌تر بوده و با شیب بیشتری دست‌خوش تغییر شده است. در چند سال ابتداییِ بازهٔ مورد بررسی، میانگین فراوانی این رویدادها در ایستگاه‌های مورد بررسی بیشترین مقدار را داشته است. پس از آن با وجود افت‌وخیزهایی، بطور کلی روند فراوانی فرین‌های سرد کاهشی بوده است. در بین سال‌های مورد بررسی، کمترین میانگین سالانهٔ دما در ایران حدود ۱۴/۶ درجهٔ سلسیوس مربوط به سال ۱۹۹۲ بوده که بیشترین میزان رویداد فرین‌های سرد نیز مربوط به همین سال است (شکل ۲). خط روند میانگین دما در بازهٔ زمانی یادشده نشان می‌دهد که میانگین دمای ایران در هر ۱۰ سال، به میزان ۰/۵ درجهٔ سلسیوس و به‌عبارت دیگر در طی دورهٔ ۳۲ سالهٔ مورد مطالعه، تقریباً بیش از ۱/۵ درجهٔ سلسیوس افزایش یافته است (شکل ۳).



شکل ۲- میانگین فراوانی سالانهٔ رویدادهای فرین سرد در ایران

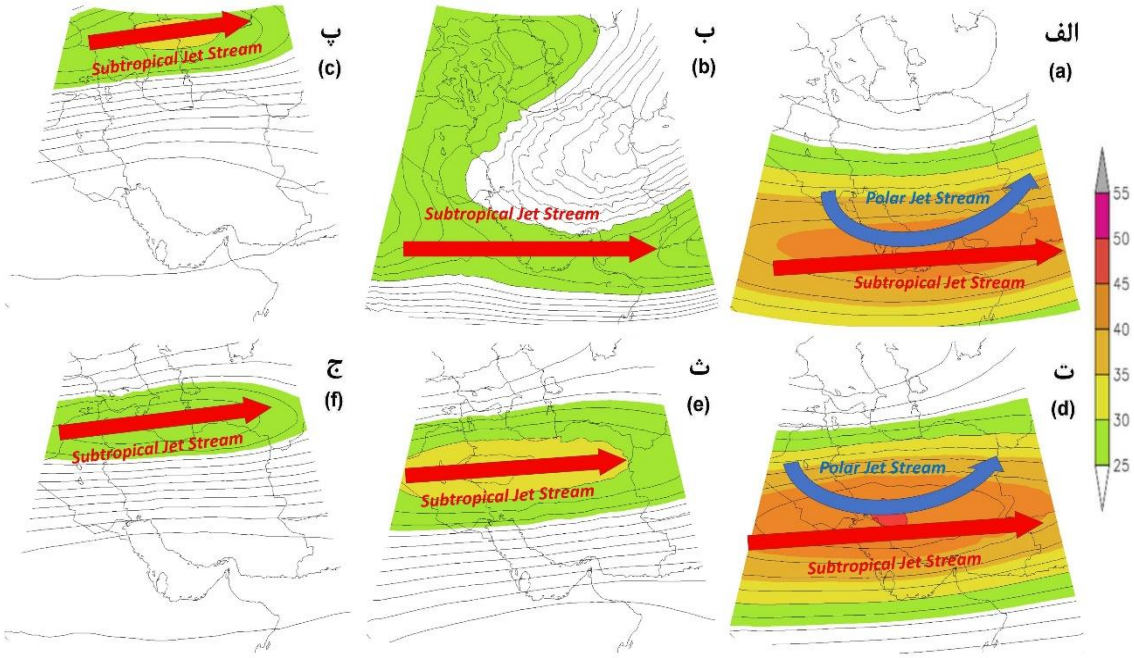
Fig. 2. Average annual frequency of extreme cold events of Iran

همانگونه که گفته شد، برای بررسی الگوهای جوی تراز بالایی وردسپهر، ابتدا داده‌های روزانهٔ باد افقی تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال در بازهٔ زمانی ۳۲ ساله با به‌کارگیری شبکهٔ خودسامان‌دهنده در قالب شش گروه خوشه‌بندی شد. در خوشه‌های شمارهٔ یک و چهار، رودبادهای قوی دیده می‌شود. این الگوها بیشترین تأثیر را در ایجاد رویدادهای سرد داشته‌اند. همچنین در خوشه‌های دو و پنج رودباد به‌صورت محدود و نسبتاً ضعیف وجود دارد. در دو خوشهٔ سه و شش نیز رودباد قوی دیده نمی‌شود (شکل ۴).



شکل ۳- میانگین سالانهٔ دما در ایران

Fig. 3. Average annual temperature of Iran



شکل ۴- خوشه‌های باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال (ارقام بر حسب متربرثانیه)؛ الف) خوشهٔ یک، ب) خوشهٔ دو، پ) خوشهٔ سه، ت) خوشهٔ چهار، ث) خوشهٔ پنج، ج) خوشهٔ شش

Fig. 4. Clusters of 300-hPa wind fields (values in m s^{-1}): (a) Cluster 1, (b) Cluster 2, (c) Cluster 3, (d) Cluster 4, (e) Cluster 5, and (f) Cluster 6

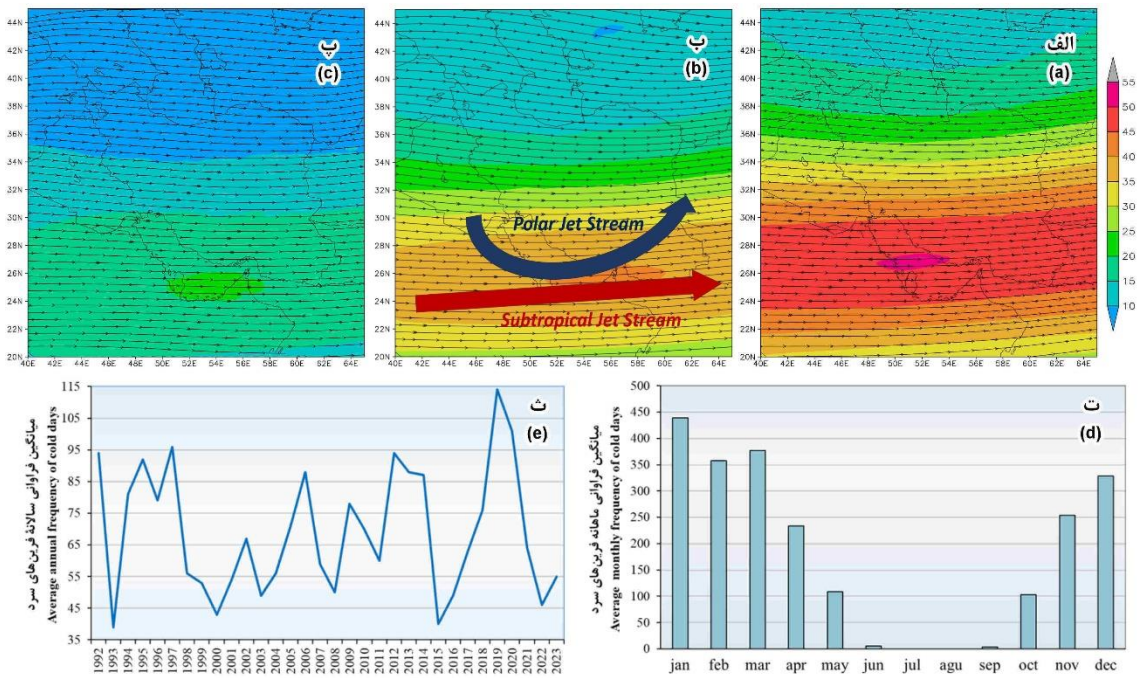
نتایج فراوانی روزهای فرین سرد در بین ایستگاه‌های مورد بررسی در هر خوشه (جدول ۱) حاکی از آن است که الگوهای شمارهٔ یک و چهار بیشترین تأثیر را در ایجاد فرین‌های سرد داشته‌اند. وجود رودباد قوی با هستهٔ بیش از ۴۰ متر برثانیه در نیمهٔ جنوبی کشور ویژگی مهم الگوهایی است که با بیش‌ترین فراوانی فرین‌های سرد همراه بوده‌اند. الگوهای شمارهٔ دو و پنج درصد کمی از رویدادهای سرد را به خود اختصاص داده‌اند. در الگوهای شمارهٔ سه و شش، فراوانی فرین‌های سرد در ایستگاه‌های مختلف نزدیک به صفر بوده که نشان‌دهندهٔ شرایط نامساعد برای وقوع رخداد فرین سرد است.

جدول ۱- درصد فراوانی رویدادهای فرین سرد در خوشه‌های شش‌گانه

Table 1- Frequency percentage of cold extreme events across the six clusters

شمارهٔ خوشه Cluster number	1	2	3	4	5	6
میانگین درصد فراوانی فرین‌های سرد در ایران Average of percentage frequency of extreme cold events in Iran	45	14	0	36	5	0

الگوی شمارهٔ یک ۴۵ درصد از میانگین فراوانی فرین‌های سرد را بین ایستگاه‌های کشور به‌خود اختصاص داده است. در این دسته رودباد قوی در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال با سرعت ۴۰ متربرثانیه در نیمهٔ جنوبی کشور دیده می‌شود. طبق این الگو، جو ایران در ناحیهٔ ورودی و خروجی سرد رودباد قرار دارد. مقایسهٔ جریان باد در سه سطح مورد بررسی (شکل ۵، الف، ب و پ) حاکی از تأثیر دو رودباد جبههٔ قطبی و جنب‌حاره در رخدادهای فرین سرد در کشور می‌باشد. بیش‌ترین فراوانی این الگو مربوط به ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس بوده است. همچنین این الگو در سال ۲۰۱۹ بیشترین فراوانی را در بازهٔ زمانی ۳۲ ساله داشته است.

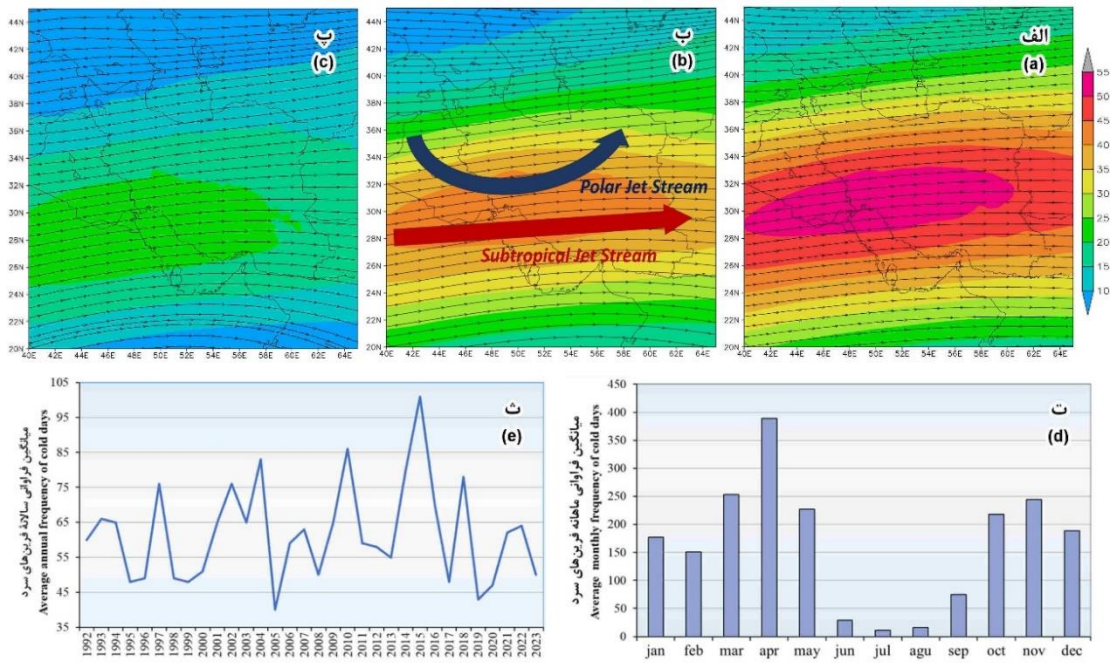


شکل ۵- خوشهٔ یک: الف) جریان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، ب) جریان باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، پ) جریان باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، ت) میانگین فراوانی ماهانه و ث) میانگین فراوانی سالانهٔ فرین‌های سرد در بازهٔ ۳۲ ساله در ایران

Fig. 5. Cluster 1: (a) wind flow at the 200-hPa level ($m\ s^{-1}$), (b) wind flow at the 300-hPa level ($m\ s^{-1}$), (c) wind flow at the 500-hPa level ($m\ s^{-1}$), (d) mean monthly frequency, and (e) mean annual frequency of cold extremes over Iran during the 32-year period

خوشهٔ چهار در همه ماه‌های سال به‌جز ژوئن، ژوئیه، اوت و سپتامبر پرتکرار بوده است (شکل ۶، ت). این الگو در وقوع

فرین‌های سرد نقش مهمی داشته است؛ چراکه به‌طور میانگین حدود ۳۶ درصد فراوانی فرین‌های سرد مربوط به این دسته است. در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال، ناحیهٔ سرد رودباد سراسر ایران به‌ویژه نواحی مرکزی و شمالی را تحت تأثیر قرار داده است. هستهٔ رودباد در ترازهای ۲۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال در نواحی مرکزی و نیمهٔ جنوبی کشور قرار دارد (شکل ۶، الف، ب، پ). همانند الگوی شمارهٔ یک، با توجه به وجود جریان باد قوی در هر سه سطح می‌توان نتیجه گرفت که ادغام رودباد جبههٔ قطبی و جنب‌حاره سبب ایجاد شرایط مساعد برای فرارفت هوای سرد به کشور شده است. فراوانی این الگوها در ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه بیشتر بوده است. برخلاف الگوی شمارهٔ یک، فراوانی این دسته در بازهٔ زمانی ۳۲ ساله روندی کاهشی دارد. در این دسته، از بین ایستگاه‌های مورد بررسی در کشور که فراوانی قابل توجه فرین‌های سرد را داشته‌اند، ایستگاه‌های واقع در نوار شمالی کشور شامل رشت، بابلسر و سمنان بیشترین فراوانی فرین‌ها را به‌خود اختصاص داده‌اند.

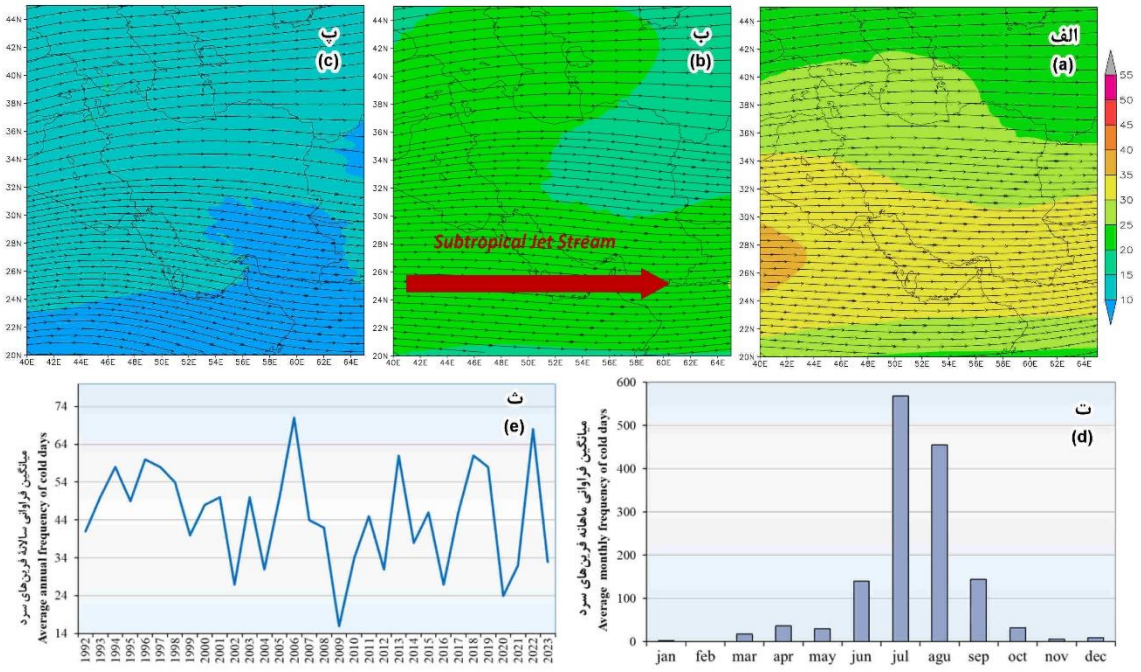


شکل ۶- خوشهٔ چهار: الف) جریان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال ($m{\cdot}s^{-1}$)، ب) جریان باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال ($m{\cdot}s^{-1}$)، پ) جریان باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ($m{\cdot}s^{-1}$)، ت) میانگین فراوانی ماهانه و ث) میانگین فراوانی سالانهٔ فرین‌های سرد در بازهٔ ۳۲ ساله در ایران

Fig. 6. (a) wind flow at the 200-hPa level ($m\ s^{-1}$), (b) wind flow at the 300-hPa level ($m\ s^{-1}$), (c) wind flow at the 500-hPa level ($m\ s^{-1}$), (d) mean monthly frequency, and (e) mean annual frequency of cold extremes over Iran during the 32-year period

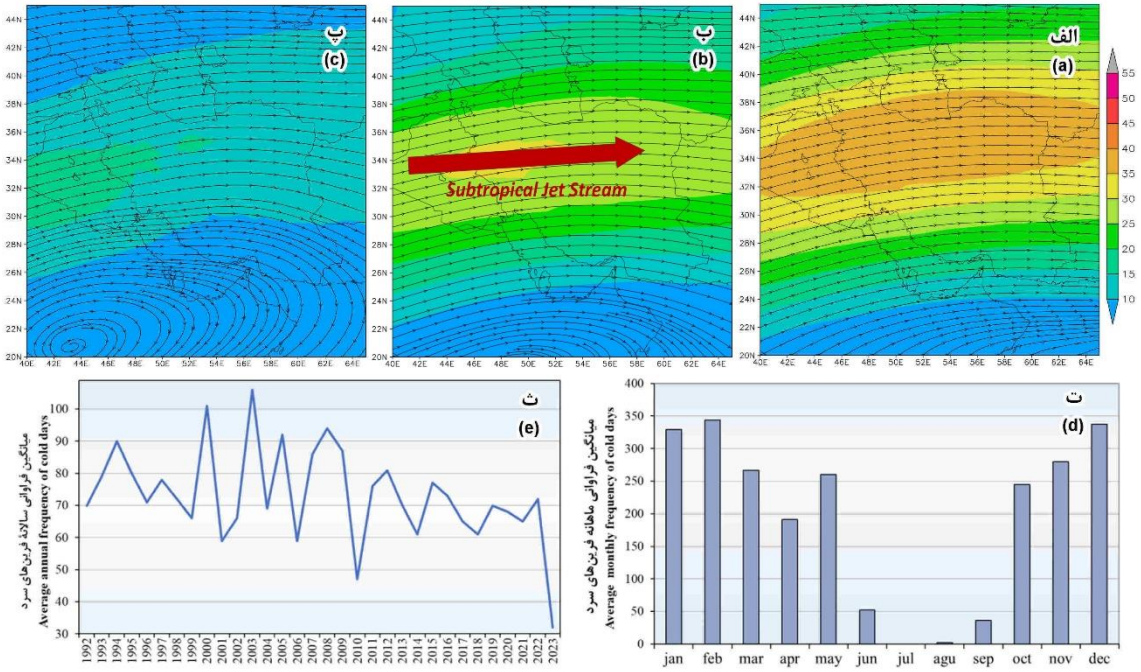
الگوی شمارهٔ دو از نظر اهمیت فراوانی وقوع فرین‌های سرد در سطح کشور در بین شش دسته، در ردهٔ سوم قرار دارد. در این دسته به‌جز رودباد ضعیف جنب‌حارهٔ تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال در نیمهٔ جنوبی ایران، در سایر ترازها رودباد دیده نمی‌شود (شکل ۷، الف، ب و پ). این شرایط نشان‌دهندهٔ نبود انرژی جنبشی قابل توجه در لایه‌های بالایی وردسپهر است. این الگو در ماه‌های مارس، آوریل و می پرتکرار بوده است (شکل ۷، ت).

الگوی شمارهٔ پنج، در پنج درصد از رویدادهای فرین سرد در کشور تأثیر داشته است. این الگو به‌طور غالب در ماه‌های می، ژوئن، سپتامبر و اکتبر رخ داده است که ماه‌های انتقالی بین فصل‌های سرد و گرم محسوب می‌شوند. در این الگو رودباد جنب‌حاره در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۸، الف) با بیشینهٔ سرعت ۳۵ تا ۴۰ متر برثانیه به صورت نواری از عراق تا شمال شرق ایران کشیده شده است. در حوالی عرض جغرافیایی ۲۲ درجهٔ شمالی گردش واچرخندی پرارتفاع جنب‌حاره کاملاً مشخص است. این گردش در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال گستردگی بیشتری دارد. این شرایط با توجه به فصل، نشان‌دهندهٔ جابه‌جایی تدریجی رودباد و پرارتفاع جنب‌حاره است.



شکل ۷- خوشهٔ دو: الف) جریان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، ب) جریان باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، پ) جریان باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، ت) میانگین فراوانی ماهانه و ث) میانگین فراوانی سالانهٔ فرین‌های سرد در بازهٔ ۳۲ ساله در ایران

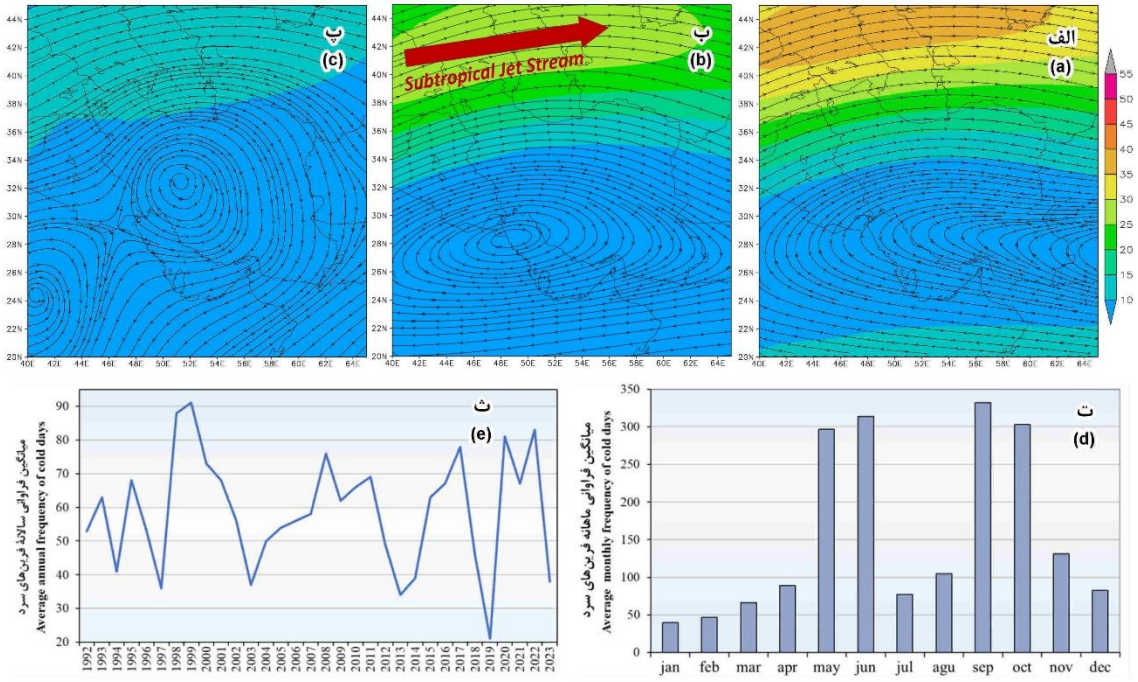
Fig. 7. Cluster 2: (a) wind flow at the 200-hPa level (m s^{-1}), (b) wind flow at the 300-hPa level (m s^{-1}), (c) wind flow at the 500-hPa level (m s^{-1}), (d) mean monthly frequency, and (e) mean annual frequency of cold extremes over Iran during the 32-year period



شکل ۸- خوشهٔ پنج: الف) جریان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، ب) جریان باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، پ) جریان باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ($m \cdot s^{-1}$)، ت) میانگین فراوانی ماهانه و ث) میانگین فراوانی سالانهٔ فرین‌های سرد در بازهٔ ۳۲ ساله در ایران

Fig. 8. Cluster 5: (a) wind flow at the 200-hPa level (m s^{-1}), (b) wind flow at the 300-hPa level (m s^{-1}), (c) wind flow at the 500-hPa level (m s^{-1}), (d) mean monthly frequency, and (e) mean annual frequency of cold extremes over Iran during the 32-year period

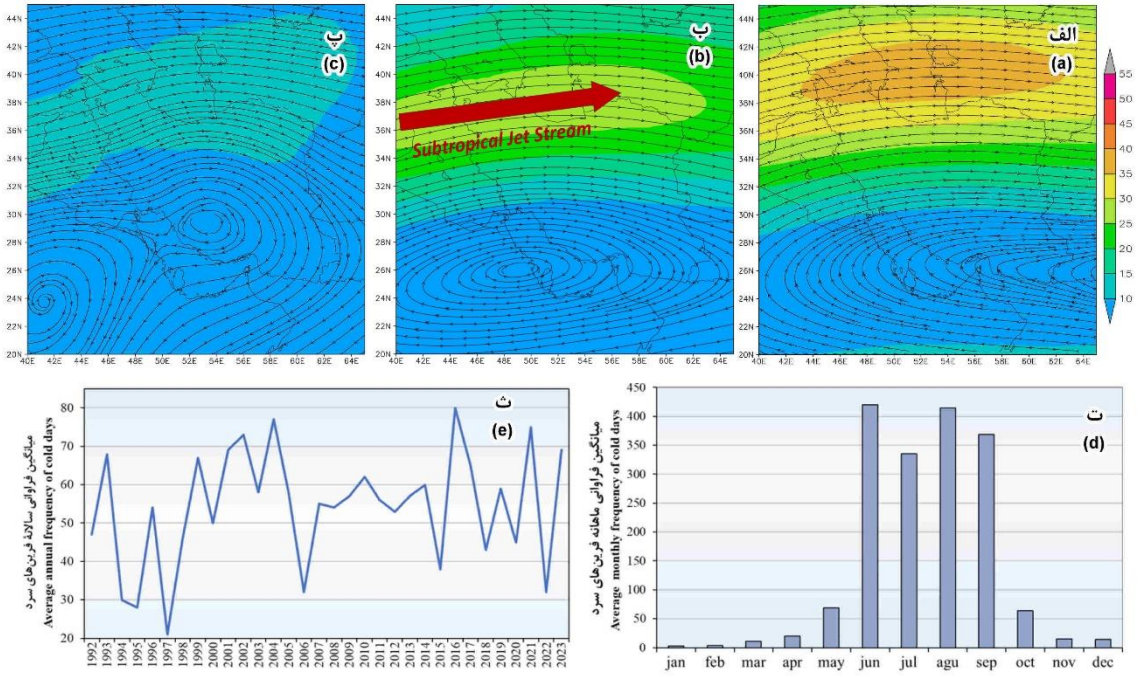
تاریخ‌های خوشهٔ سه غالباً مربوط به ماه‌های ژوئیه و اوت، و فراوانی فرین‌های سرد در این خوشه نزدیک به صفر درصد بوده است. بنابراین این خوشه نقشی در رخدادهای فرین سرد کشور ندارد. جریان باد در هر سه تراز بالایی وردسپهر (شکل ۹، الف، ب و پ)، حرکت واچرخندی ناشـ ی از حاکمیت پرارتفاع جنب‌حاره را به خوبی نشـــان می‌دهد. همچنین رودباد جنب‌حاره که هستهٔ آن در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال قرار دارد، در عرض‌های شمالی منطقهٔ مورد بررسی دیده می‌شود. الگوی شمارهٔ شش که در ماه‌های ژوئن تا سپتامبر بیشترین فراوانی را به خود اختصاص می‌دهد، همانند الگوی شمارهٔ سه نقشی در رخدادهای فرین سرد ایران ندارد. در این دسته، در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال رودباد دیده نمی‌شود و تنها جریان بادی با سرعت بین ۲۵ تا ۳۰ متر برثانیه در نواحی شمالی ایران رخ می‌دهد (شکل ۱۰، ب).



شکل ۹- خوشهٔ سه: الف) جریان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال ($m{\cdot}s^{-1}$)، ب) جریان باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال ($m{\cdot}s^{-1}$)، پ) جریان باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ($m{\cdot}s^{-1}$)، ت) میانگین فراوانی ماهانه و ث) میانگین فراوانی سالانهٔ فرین‌های سرد در بازهٔ ۳۲ ساله در ایران

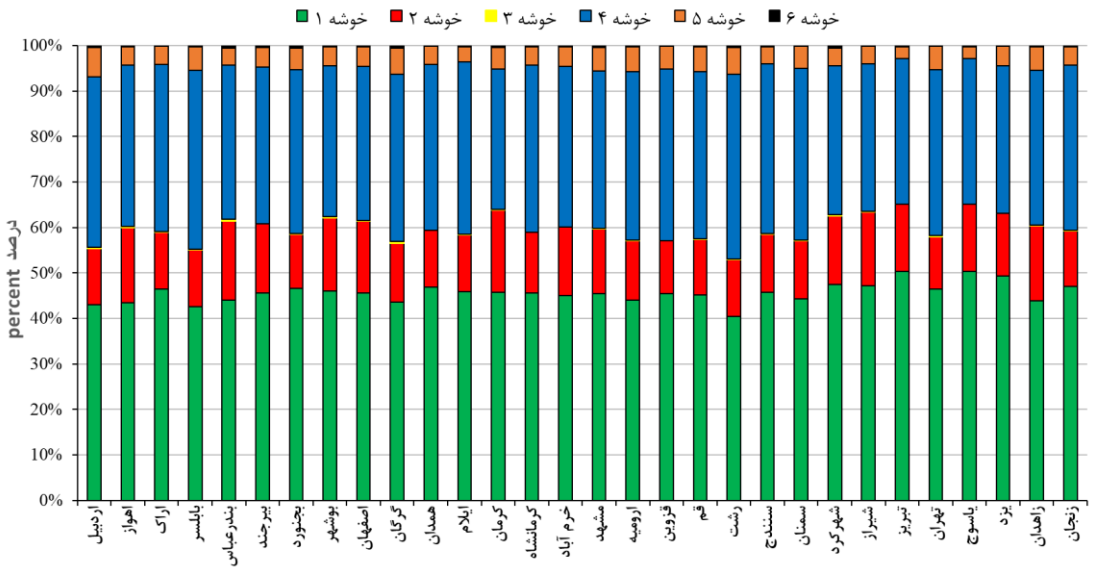
Fig. 9. Cluster 3: (a) wind flow at the 200-hPa level (m s^{-1}), (b) wind flow at the 300-hPa level (m s^{-1}), (c) wind flow at the 500-hPa level (m s^{-1}), (d) mean monthly frequency, and (e) mean annual frequency of cold extremes over Iran during the 32-year period

الگوهای شـمارهٔ یک و چهار بیش از ۷۰ درصـد فراوانی فرین‌های سـرد را در ایسـتگاه‌های مورد بررسـی به خود اختصـاص می‌دهند (شـکل ۱۱). در این دو دسـته، بررسی الگوی باد در ترازهای بالایی وردسپهر حاکی از جریان باد قوی است که حاصل ادغام دو رودباد جبههٔ قطبی و جنب‌حاره می‌باشد. این شرایط سبب ریزش هوای سرد و ماندگاری آن در ایران می‌شود.



شکل ۱۰– خوشهٔ شش: الف) جریان باد تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال ($m{\cdot}s^{-1}$)، ب) جریان باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال ($m{\cdot}s^{-1}$)، پ) جریان باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ($m{\cdot}s^{-1}$)، ت) میانگین فراوانی ماهانه و ث) میانگین فراوانی سالانهٔ فرین‌های سرد در بازهٔ ۳۲ ساله در ایران

Fig. 10. Cluster 6: (a) wind flow at the 200-hPa level (m s^{-1}), (b) wind flow at the 300-hPa level (m s^{-1}), (c) wind flow at the 500-hPa level (m s^{-1}), (d) mean monthly frequency, and (e) mean annual frequency of cold extremes over Iran during the 32-year period



شکل ۱۱– درصد فراوانی رویدادهای فرین‌های سرد در ایستگاه‌های مورد بررسی در بازهٔ زمانی ۳۲ سال برای هر خوشه

Fig. 11. Percentage frequency of cold extreme events at the studied stations over the 32-year period for each cluster

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر برای بررسی ارتباط بین فرین‌های دمایی سرد و رودبادهای تراز بالایی وردسپهر در ایران، داده‌های باد تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال با به‌کارگیری شبکهٔ عصبی خودسامان‌دهنده در قالب شش الگو خوشه‌بندی شدند. بر پایهٔ نتایج بررسی آماری، با توجه به روند افزایشی میانگین دمای هوای کشور بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۳ و در راستای پدیدهٔ گرمایش جهانی و افزایش دمای کرهٔ زمین، میانگین فراوانی رویدادهای فرین سرد در کشور کاهش یافته است، که قابل انتظار بود. از دیدگاه سینوپتیکی، همان‌طور که پارک و همکاران (Park et al., 2020) نیز نشان دادند، آرایش الگوهای تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال با رویدادهای فرین سرد مرتبط است. نتایج بررسی الگوهای حاصل از خوشه‌بندی و فراوانی رویدادهای فرین در این تحقیق، همسو با مطالعات ژو و همکاران (Zhou et al., 2022)، خیمنز- استیو و دومایسن (Jimenez-Esteve & Domeisen, 2022) و پرز و همکاران (Perez et al., 2021) نشان داد که وجود رودباد از عوامل مهم در بروز دماهای فرین سرد در ایران است و به‌طور خاص حضور رودباد قوی در نیمهٔ جنوبی کشور، که موجب قرارگیری جو ایران در قسمت سرد رودباد می‌شود، شرایط را برای نفوذ هوای سرد فراهم می‌کند. نتایج بررسی الگوهای جریان باد در سه سطح ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، همانند مطالعهٔ روسی و همکاران (Rousi et al., 2022)، حاکی از تأثیر دو رودباد جبهۀ قطبی و جنب‌حاره در رویداد فرین دمایی می‌باشد. رودباد قوی با هستهٔ بیش از ۴۰ متربرثانیه در نیمهٔ جنوبی ایران از ویژگی‌های بارز الگوهای شمارهٔ یک و چهار به‌ترتیب با ۴۵ و ۳۶ درصد میانگین فراوانی فرین‌های سرد است. این الگو حاصل ادغام رودبادهای جنب‌حاره و جبههٔ قطبی است که هستهٔ آن غالباً در نیمهٔ جنوبی کشور قرار دارد.

بیشترین فراوانی دستهٔ شمارهٔ یک در ماه‌های سرد سال شامل ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس، و دستهٔ شمارهٔ چهار در ماه‌های سرد و معتدل (همهٔ ماه‌های سال به‌جز ژوئن، ژوئیه، اوت و سپتامبر) رخ داده است. در الگوی شمارهٔ دو که رودباد ضعیف جنب‌حاره در نیمهٔ جنوبی ایران قرار دارد، حدود ۱۴ درصد از رخداد فرین‌های سرد اتفاق افتاده است. این الگو در اواخر زمستان و اوایل بهار (ماه‌های مارس، آوریل و می) پر تکرارتر بوده است. همچنین در الگوی شمارهٔ پنج (با پنج درصد از فراوانی کل رویدادهای سرد) که اغلب در ماه‌های اعتدالی رخ داده است، رودباد نسبتاً ضعیفی در نوار مرکزی کشور از غرب به شرق جریان دارد. در دو الگوی دیگر (شماره‌های سه و شش) که فراوانی فرین‌های سرد در ایستگاه‌های مختلف تقریباً صفر بوده است، جریان رودباد در جو ایران وجود نداشته است و تنها رودباد جنب‌حاره در عرض‌های شمالی منطقه خارج از جو ایران دیده می‌شود. وجود رودباد قوی حاصل از ادغام دو رودباد جنب‌حاره و جبههٔ قطبی در نیمهٔ جنوبی ایران از عوامل مهم رخداد فرین‌های سرد است. به‌منظور بررسی دقیق‌تر، مطالعهٔ تغییرات رودباد با توجه به گرمایش جهانی و ارتباط آن با رویدادهای فرین سرد به صورت مطالعهٔ موردی در نقاط مختلف ایران پیشنهاد می‌شود.

References

Adams, R. E., Lee, C. C., Smith, E. T., & Sheridan, S. C. (2021). The relationship between atmospheric circulation patterns and extreme temperature events in North America, *International Journal of Climatology, 41*(1), 92-103. https://doi.org/10.1002/joc.6610

Asakereh, H., & Shahbaee Kotenaee, A. (2018). Synoptic Analysis of Productive Patterns of Winter Cold Waves in Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 6*(3), 109-124. [in Persian] https://doi.org/10.22067/geo.v6i3.59919

Di Capua, G., Sparrow, S., Kornhuber, K., Rousi, E., Osprey, S., Wallom, D., ... & Coumou, D. (2021). Drivers behind the summer 2010 wave train leading to Russian heatwave and Pakistan flooding. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, *4*(1), 55. https://doi.org/10.1038/s41612-021-00211-9

Ehsan, M. A., Nicolì, D., Kucharski, F., Almazroui, M., Tippett, M. K., Bellucci, A., ... & Kang, I. S. (2020). Atlantic Ocean influence on Middle East summer surface air temperature. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, *3*(1), 5. https://doi.org/10.1038/s41612-020-0109-1

Eskandari Damaneh, H., Gholami, H., Mahdavi, R., Khoorani, A., & Li, J. (2019). Evaluation of land degradation trend using satellite imagery and climatic data (Case study: Fars province). *Desert Ecosystem Engineering, 8*(24), 49-64. [in Persian] https://doi.org/10.22052/deej.2018.7.24.35

Hewitson, B. C., & Crane, R. G. (2002). Self-organizing maps: applications to synoptic climatology. *Climate Research*, *22*(1), 13-26. https://doi.org/10.3354/cr022013

Jiménez-Esteve, B., & Domeisen, D. I. V. (2022). The role of atmospheric dynamics and large-scale topography in driving heatwaves. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 148*(746), 2344-2367. https://doi.org/10.1002/qj.4306

Kavyani, M., & Alijani, B. (2019). *The Foundations of Climatology*. 21nd Edn. Tehran: SAMT. [in Persian]

Kornhuber, K., Coumou, D., Vogel, E., Lesk, C., Donges, J. F., Lehmann, J., & Horton, R. M. (2020). Amplified Rossby waves enhance risk of concurrent heatwaves in major breadbasket regions. *Nature Climate Change, 10*(1), 48-53. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0637-z

Liu, X., Xu, Z., Peng, D., & Wu, G. (2018). Influences of the North Atlantic Oscillation on extreme temperature during the cold period in China. *International Journal of Climatology, 39*(1), 43-49. https://doi.org/10.1002/joc.5779

Nygard, T., Papritz, L., Naakka, T., & Vihma, T. (2023). Cold wintertime air masses over Europe: where do they come from and how do they form? *Weather and Climate Dynamics, 4*, 943-961. https://doi.org/10.5194/wcd-4-943-2023

Park, T. W., Hong, J. G., & Park, D. S. R. (2020). Intra-seasonal characteristics of wintertime extreme cold events over South Korea. *International Journal of Climatology, 40*(5), 2639-2658. https://doi.org/10.1002/joc.6356

Pazhoh, F. (2020). Identification of the effective jet stream patterns in the heavy Precipitation of the cold season in the southern half of Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards, 7*(1), 177-196. [in Persian] https://doi.org/10.29252/jsaeh.7.1.12

Perez, E., Ryan, S., Andres, M., Gawarkiewicz, G., Ummenhofer, C. C., Bane, J., & Haines, S. (2021). Understanding physical drivers of the 2015/16 marine heatwaves in the Northwest Atlantic. *Scientific Reports, 11*(1), 1-11. https://doi.org/10.1038/s41598-021-97012-0

Ratna, S. B., Osborn, T. J., Joshi, M., & Luterbacher, J. (2020). The influence of Atlantic variability on Asian summer climate is sensitive to the pattern of the sea surface temperature anomaly. *Journal of Climate, 33*(17), 7567-7590. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0039.1

Rousi, E., Kornhuber, K., Beobide-Arsuaga, G., Luo, F., & Coumou, D. (2022). Accelerated western European heatwave trends linked to more-persistent doublejets over Eurasia. *Nature Communications, 13*, 3851. https://doi.org/10.1038/s41467-022-31432-y

Saligheh, M. (2017). *Synoptic Climatology of Iran*. 2nd Edn. Tehran: SAMT. [in Persian]

Sepadeh, D., Salahi, B., Alijani, B., & Zeynali, B. (2021). A study of the effect of the polar Jet stream on the precipitation of the cold season in Iran. *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences, 4*(3), 178-192. [in Persian] https://www.ims-jmas.net/article_161011.html

Shaw, T. A., & Miyawaki, O. (2024). Fast upper-level jet stream winds get faster under climate change. *Nature Climate Change, 14*, 61-67. https://doi.org/10.1038/s41558-023-01884-1

Sheridan, S. C., & Lee, C. C. (2011). The self-organizing map in synoptic climatological research. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 35*(1), 109-119. https://doi.org/10.1177/0309133310397582

Stendel, M., Francis, J., White, R., Williams, P. D., & Woollings, T. (2021). The jet stream and climate change. In *Climate change* (pp. 327-357). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821575-3.00015-3

Trevisiol, A., Gilli, L., & Faggian, P. (2022). Short and long-term projections of Rossby wave packets and blocking events with particular attention to the northern hemisphere. *Global and Planetary Change, 209*, 103750. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103750

Tuel, A., & Martius, O. (2024). Persistent warm and cold spells in the Northern Hemisphere extratropics: regionalisation, synoptic-scale dynamics and temperature budget. *Weather and Climate Dynamics, 5*(1), 263-292. https://doi.org/10.5194/wcd-5-263-2024

Zenozi Alamdari, N., Sobhani, B., Islahi, M., & Mohammadi, M. (2025). Evaluating the consequences of climate change on the trend of extreme events and its impact on the phenology of almond trees, a case study: East Azarbaijan province. *Iranian Journal of Soil and Water Research, 55*(12), 2351-2371. [in Persian] https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.375011.669697

Zhou, Y., Yuan, J., Wen, Z., Huang, S., Chen, X., Guo, Y., & Lin, Q. (2022). The impacts of the East Asian subtropical westerly jet on weather extremes over China in early and late summer. *Atmospheric and Oceanic Science Letters, 15*(5), 100212. https://doi.org/10.1016/j.aosl.2022.100212

Vol. 14, No. 1, Spring 2026, p. 170-192 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2026.96222.1621 OPEN ACCESS

Future Projection of Precipitation across the Altitudinal Zones of Iran

Elham Salahshur Boghmechi [1], Reza Doostan [1]*, Iman Babaeian [2]

[1] Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

[2] Research Institute for Meteorology and Atmospheric Science, Climate Research Center, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 29 October 2025

Revised: 01 February 2026

Accepted: 02 February 2026

Available Online:

07 February 2026

Keywords:

Precipitation

Altitude Zones

Climate Change

CMIP6

Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)

Iran

ABSTRACT

The aim of this study is to project future changes in precipitation across the altitudinal zones of Iran under global climate change scenarios. Daily precipitation data from 14 selected synoptic stations located in mountainous and highland regions during the baseline period (1985–2014), along with the outputs of CMIP6 models under three green house-gas emission scenarios—low (SSP1-2.6), moderate (SSP2-4.5), and high (SSP5-8.5) were employed. The results reveal that precipitation changes over Iran are spatially heterogeneous and largely affected by altitude and geographical position. On an annual scale, among six altitudinal zones, only the northern lowlands (Caspian coast) and the southern lowlands (Persian Gulf and Oman Sea coasts) exhibit statistically significant precipitation trends, whereas the other four zones (mountainous, inner foothill, outer foothill, and central regions) show non-significant increasing or decreasing trends. Seasonally, spring precipitation is expected to increase under the low-emission (sustainable development) scenario in both near and distant futures. Summer precipitation is projected to decline in northern lowlands, while an increase in summer and autumn rainfall is anticipated for southern lowlands and outer foothills. Moreover, most altitudinal zones show a positive tendency in autumn precipitation, although not statistically significant in some scenarios. Overall, the findings align with the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and with credible regional studies, emphasizing the need to focus water-resource management on areas with significant precipitation decrease (northern lowlands) and those with marked increase (southern lowlands), as well as on the generally decreasing trends observed in the high-altitude regions.

* Corresponding author: Reza Doostan E-mail address: doostan@um.ac.ir

How to cite this article: Salahshur Boghmechi, E., Doostan, R., & Babaeian, I. (2026). Future Projection of Precipitation across the Altitudinal Zones of Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *15*(1), 170-192. https://doi.org/10.22067/geoeh.2026.96222.1621

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

The aim of this study is to project future precipitation changes across different altitudinal zones of Iran under global climate change conditions. Climate change is widely recognized as one of the greatest challenges facing humanity in the twenty-first century. According to major international organizations, climate change is defined in two principal ways: the World Meteorological Organization (WMO) describes it as a long-term increase or decrease in the mean values of climatic variables, whereas the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) emphasizes changes in climate anomalies driven primarily by human activities. These anomalies manifest through altered patterns of droughts, floods, heatwaves, cold spells, glacier retreat, sea-level rise, and other extreme events (Ahmadi et al., 2015).

The specific climate hazards affecting any region depend largely on its inherent climatic characteristics. Climate change influences the hydrological cycle, water availability, and water demand mainly through modifications in temperature and precipitation regimes. In this context, projecting future changes in temperature and precipitation using models from the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6), which benefit from improved physical parameterizations and higher accuracy, can provide valuable insights for long-term water-resource planning and management (Mahabadi et al., 2013). Iran is predominantly an arid and semi-arid country, receiving less than one-third of the global average annual precipitation (Alizadeh, 2017). Moreover, this limited precipitation has become increasingly irregular under climate change conditions. For instance, previous studies have projected a declining precipitation trend in northwestern Iran toward the end of the twenty-first century (Mohammadi et al., 2012), while changes in eastern Iran range from −11% to −15% in the near future and from −8% to +15% in the distant future relative to the observational period (Babaeian et al., 2021).

The natural setting of Iran is unique. The Iranian Plateau lies within the extensive Alpine–Himalayan mountain belt while simultaneously occupying the core of the world's largest desert belt, stretching from the Sahara Desert in North Africa to the Gobi Desert in Central Asia. Historically, due to pronounced altitudinal variability and limited atmospheric precipitation, human settlements in Iran have mainly developed in foothill regions and along river corridors in plains. Altitude therefore plays a critical role in shaping Iran's climate, with precipitation generally increasing with elevation in most regions. Given this background, the present study investigates future precipitation changes across Iran's altitudinal zones at both annual and seasonal scales. Particular emphasis is placed on assessing the role of altitude in modulating precipitation responses under different socioeconomic scenarios, an aspect that has received relatively limited attention in previous studies.

Material and Methods

This study employs both observational data and climate model outputs from the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6). Daily observational precipitation data were obtained from 14 synoptic stations representing different altitudinal zones of Iran (Alijani, 2002). The baseline period of 1985–2014 corresponds to the historical reference period adopted in the Sixth Assessment Report of the IPCC.

Climate model data for the historical period (1985–2014) and the future period (2021–2100) were extracted from the Earth System Grid Federation (ESGF) database. Future projections were analyzed under three Shared Socioeconomic Pathway scenarios: sustainable development (SSP1-2.6), intermediate development (SSP2-4.5), and fossil-fuel-based development (SSP5-8.5). Four Earth System Models CMCC-ESM2, GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR, and NorESM2-MM—were selected for analysis.

Future precipitation changes were assessed for two time horizons: the near future (2021–2050) and the far future (2061–2090). Accordingly, precipitation trends under different socioeconomic scenarios were evaluated for mountainous, inner and outer foothill, northern lowland, southern lowland, and central zones. The statistical significance of precipitation trends was assessed using Student's t-test.

Results and Discussion

Annual precipitation in the high-altitude zone (1,340 m), represented by the Tabriz station, is projected to decrease by approximately 5–10% under all scenarios and in both future periods relative to the baseline period. Overall, precipitation in this zone exhibits a decreasing trend; however, this decline is statistically significant only in the distant future under the medium-emission scenario (SSP2-4.5). In the inner foothill zone (1,247 m), precipitation at the Mashhad station shows a statistically significant increase in both the near and distant future under the low-emission scenario (SSP1-2.6), whereas a non-significant decreasing trend is observed under the other scenarios. The most pronounced seasonal increase in precipitation is projected for autumn, with the highest increase occurring at the Isfahan station. Seasonally, under the SSP1-2.6 scenario, winter precipitation shows a significant increase in the near future at Mashhad. In contrast, a significant decrease in precipitation in the distant future under the medium-emission scenario is observed only at the Isfahan station.

For the outer foothill zone (1,242 m), an increase in annual precipitation is projected, which is statistically significant in the near future under both SSP1-2.6 and SSP2-4.5 scenarios. The magnitude of this increase ranges from approximately 10% to 40% compared to the baseline period (1985–2014). In general, autumn precipitation in the outer foothill zone shows a decreasing tendency. Conversely, winter precipitation increases under most scenarios—except for the high-emission scenario (SSP5-8.5)—although these increases are not statistically significant.

In the central region (1,300 m), annual precipitation is projected to increase by about 5–10%. This increase is statistically significant only in the near future under the SSP1-2.6 scenario, while no significant changes are detected under other scenarios. Autumn precipitation increases under all scenarios, with a statistically significant rise observed at the Zahedan station. Winter precipitation generally shows a non-significant increasing trend, except under the distant-future SSP5-8.5 scenario, where a decrease is projected. In the northern lowland region (12 m), annual precipitation changes are negative under most scenarios, except for the near-future SSP1-2.6 scenario, and the decreasing trend is statistically significant under the medium-emission scenario. Summer precipitation across this region shows a significant decline. Changes in autumn precipitation are not statistically significant in any scenario–period combination and generally remain below normal conditions. At the Sari station, precipitation follows the overall regional decreasing trend, whereas at the Gorgan station, precipitation exhibits a non-significant increase in most scenario periods, except under the medium-emission scenario in the distant future. Winter precipitation in this region also generally decreases, except under SSP1-2.6 and SSP2-4.5 in the near future. Overall, precipitation trends in the northern lowlands are predominantly negative, although most are not statistically significant. In contrast, annual precipitation in the southern lowland region (12 m) shows a statistically significant increase under several scenarios in both the near and distant future. This region exhibits the largest increase in precipitation among all six altitudinal zones. In general, summer and autumn precipitation are projected to increase, whereas winter precipitation tends to decrease. This decrease is statistically significant under the medium-emission scenario in the distant future, with the most pronounced decline observed at the Abadan station. Conversely, winter precipitation at the Chabahar station increases and is statistically significant under the near-future SSP5-8.5 scenario.

Table 1 summarizes precipitation changes across the different altitudinal zones of Iran and highlights trends that are statistically significant at the 0.05 level. Among the six altitudinal zones, statistically significant precipitation changes are observed only in the two low-lying regions: the northern lowlands (Caspian Sea coast) and the southern lowlands (Persian Gulf and Oman Sea coast). In contrast, precipitation changes in the remaining four higher-elevation zones mountainous, inner foothills, outer foothills, and central regions are not statistically significant.

Table 1- Changes in regional precipitation in the country (in percentage) and their significance at the 0.05 level

Southern lowland	Northern lowland	Central	Outer-Foothill	Inner-Foothill	High	Scenario	Period
18.6	2.6	23.3	33.2	35.7	3.7	SSP1-2.6	2050-2021
14.2	-1.7	21	39.2	4.2	1.5	SSP2-4.5	
32.9	-6.5	21.1	20.1	2.4	-3.2	SSP5-8.5	
29.7	-1.4	18.9	32	13.7	-4.8	SSP1-2.6	2061-2090
4.9	**-7.7**	17.9	27.5	-0.5	-4.2	SSP2-4.5	
44.9	-5.2	17.1	22.1	3.7	-4.6	SSP5-8.5	

Conclusion

This paper projected future precipitation behavior across different altitudinal zones of Iran using observational data from 14 representative synoptic stations and bias-corrected outputs from climate models participating in the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) under multiple socioeconomic scenarios. The results reveal a heterogeneous pattern of precipitation change across Iran's altitudinal zones, highlighting the critical role of elevation and geographic location in shaping future precipitation regimes. On an annual scale, among the six investigated altitudinal zones, statistically significant precipitation changes are observed only in two low-lying regions: the northern lowlands along the Caspian Sea coast and the southern lowlands adjacent to the Persian Gulf and the Oman Sea. In these regions, precipitation is projected to decrease and increase significantly, respectively, under different scenarios. In contrast, the remaining four zones mountainous regions, inner foothills, outer foothills, and central highlands exhibit both increasing and decreasing precipitation trends, none of which are statistically significant at the annual scale. Although a decreasing trend dominates in the mountainous zone, it does not reach statistical significance. Similarly, projected increases in precipitation in the central and outer foothill zones remain positive but statistically insignificant.

At the seasonal scale, a notable increase in spring precipitation is projected under the low-emission scenario (SSP1-2.6) in both the near and distant future. Summer precipitation is expected to decline in the northern lowlands, whereas an increase in summer and autumn precipitation is projected for the southern lowlands and, to a lesser extent, the outer foothill zones. Moreover, the direction of autumn precipitation changes in many high-elevation regions of Iran is generally positive, although these changes are not statistically significant in some scenario–period combinations. In the overall assessment, it is important to note that actual water availability and demand are influenced not only by precipitation but also by other climatic factors, particularly temperature. Based on established hydro-meteorological relationships, an increase of 1 °C in air temperature leads to an approximate 7% rise in atmospheric moisture demand, which may partially or fully offset the benefits of increased precipitation in some regions.

The findings of this study are consistent with those reported in reputable national and international research, including the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Overall, the results demonstrate that future precipitation changes across Iran's altitudinal zones are highly heterogeneous, underscoring the need for region-specific adaptation and water-resource management strategies, with particular attention to areas experiencing significant precipitation reductions in the northern lowlands and pronounced increases in the southern lowlands.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۱۹۲-۱۷۰

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2026.96222.1621 دسترسی آزاد

چشم انداز آیندهٔ بارش نواحی ارتفاعی ایران

الهام سلحشور بقمچی[۱]، رضا دوستان[۱*]، ایمان بابائیان[۳]

[۱] گروه جغرافیا، دانشکدهٔ ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
[۲] پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکدهٔ اقلیم‌شناسی و تغییر اقلیم، مشهد، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۳

کلمات کلیدی:

بارش

نواحی ارتفاعی

تغییر اقلیم

پروژهٔ مدل‌های جفت شده فاز ششم (CMIP6)

سناریوهای مشترک اقتصادی –اجتماعی (SSPs)

ایران

چکیده

هدف این پژوهش پیش‌نگری تغییرات بارش در پهنه‌های ارتفاعی ایران تحت شرایط تغییر اقلیم جهانی است. به این منظور بارش روزانه ۱۴ ایستگاه سینوپتیک منتخب در نواحی ارتفاعی از ۲۰۱۴-۱۹۸۵ و مدل‌های فاز ششم پروژه CMIP6، تحت سه سناریوی انتشار کم (SSP1-2.6)، میانه (SSP2-4.5) و خیلی زیاد (SSP5-8.5) گازهای گلخانه‌ای استفاده شد. نتایج نشان داد، تغییرات بارش ایران، ناهمگون و متأثر از ارتفاع و موقعیت جغرافیایی است. در مقیاس سالانه، از شش ناحیه ارتفاعی، تنها دو ناحیهٔ پست شمالی (سواحل دریای خزر) و پست جنوبی (سواحل خلیج فارس و دریای عمان) تغییرات معنادار بارش دارند. تغییرات بارش چهار ناحیهٔ دیگر(مرتفع، کوهپایه داخلی - بیرونی و مرکزی) روند افزایشی و کاهشی غیرمعنادار است. در مقیاس فصلی، افزایش بارش بهار در سناریوی انتشار کم (توسعه پایدار) در آینده نزدیک و دور قابل انتظار است. کاهش بارش تابستان برای نواحی پست شمالی و افزایش بارش تابستان و پاییز برای نواحی پست جنوبی و کوهپایه بیرونی پیش‌نگری شد. افزون بر این، جهت تغییرات بارش فصل پاییز در بسیاری از نواحی ارتفاعی ایران مثبت است، اگر چه در برخی سناریوها معنادار تشخیص داده نشد. یافته‌های این تحقیق با گزارش ششم ارزیابی هیئت بین الدول تغییر اقلیم و مطالعات معتبر داخلی همخوانی دارد. این نتایج، ضرورت تمرکز بر مناطق دارای کاهش معنادار بارش مانند ناحیه پست شمالی و افزایش معنادار در ناحیه پست جنوبی و کاهشی بودن اغلب بارش‌ها در نواحی مرتفع را برای توسعهٔ پایدار منابع آب مورد تأکید قرار می‌دهد.

* نویسندهٔ مسئول: رضا دوستان
Email: doostan@um.ac.ir

مقدمه

بارش از تغییر پذیرترین عناصر جوی از نظر زمانی و مکانی است (Halibian, 2008) و به عنوان ورودی چرخه آب در یک ناحیه می‌باشد (Mohammadi, Sari-Saraf & Rostamzadeh, 2012). یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های بشر در قرن بیست و یکم، تغییر اقلیم است. دو تعریف عمدهٔ تغییر اقلیم، کاهش یا افزایش مستمر میانگین پارامترهای اقلیمی توسط سازمان هواشناسی جهانی (WMO) و افزایش ناهنجاری‌های اقلیمی ناشی از فعالیت‌های انسان توسط هیئت بین الدول تغییر اقلیم (IPCC) می باشد. امروزه عمدتاً تأکید بر تعریف دوم است. مخاطرات اقلیمی در قالب تغییر در الگوی رفتاری خشکسالی، سیل، موج گرما و سرما، ذوب یخ‌ها و بالا آمدن سطح آب دریا، و غیره نمود دارد (Ahmadi, Lashkari, Azadi & Kaykhosravi, 2015). طبیعتاً نوع مخاطرات اقلیمی هر منطقه متناسب با ویژگی‌های اقلیمی آن منطقه است. کرهٔ زمین از آخرین دورهٔ یخبندان حدود ۱۲۰۰۰ سال قبل، وارد دورهٔ گرم یا بین یخچالی شده است و به طور طبیعی دمای کرهٔ زمین رو به گرم شدن دارد، اما انسان در طی سدهٔ گذشته تا کنون با مصرف بیش از حد سوخت‌های فسیلی از یک سو و افزایش جمعیت جهان و تغییر کاربری اراضی از سوی دیگر، سرعت گرمایش و تغییر زمین را تسریع کرده است. چنانکه دانشمندان از جمله تیندال (Tyndall, 1861)، تغییراقلیم ناشی از تغییر دی اکسید کربن جو، و آرهینوس (Arrhenius, 1896)، دو برابر شدن مقدار دی اکسیدکربن و افزایش دمای ۵ درجه‌ای را پیش‌بینی کردند. امروزه بعد از تغییر اقلیم مرتبط با انسان، که با تخریب اکوسیستم‌ها در کرهٔ زمین همراه است، چشمگیرتر است. تغییر اقلیم موجب افزایش مخاطرات زیست محیطی، کاهش بارش و افزایش بارش جدی در جهان می‌شود. میانگین نزولات جوی با توجه به الگوی گردش کلی هوا در ایران، یک سوم میانگین جهانی است که گرمایش جهانی و تغییر اقلیم باعث کاهش بارش و افزایش پهنه‌های کم بارش، روزهای بی‌بارش، بارش‌های حدی و سیلاب شده است. پیش‌نگری بارش همواره مورد توجه محققان در مناطق مختلف بوده است، چنانکه حسین و همکاران (Hussien, Memon & Savic, 2016) پیش‌نگری بارش‌های آینده را با استفاده از روش پیش‌نگری‌های احتمالی تحت سناریوهای انتشار مختلف (RCP[1]) در راستای کاهش ریسک کمبود آب و توسعه برنامه مدیریت شبکه آب هوشمند مطالعه کردند. آنها نشان دادند که روش‌های پیش‌نگری نقش مهمی در پیش‌نگری دقیق بارش دارند. اخیراً، از روش‌های یادگیری ماشین به طور گسترده‌ای برای پیش‌نگری بارش استفاده می شود (Huang, Lin, Huang & Xing, 2017). شناخت الگوهای مقیاس‌کاهی در مقیاس منطقه‌ای برای شبیه سازی بارش، اولین قدم ضروری قبل از پیش‌نگری بارش در آینده است. روشهای آماری تصحیح برونداد بارش مدل‌های اقلیمی معمولا متناسب با آمار بارش مشاهداتی هستند. بر اساس نظریه فیشر (Fisher et al., 1994)، سناریوی تغییر اقلیم مرحله‌ای از تغییر در متغیرهای هواشناسی است که بر اساس سطح پذیرفته شده‌ای از غلظت دی اکسید کربن و سایر گازهای گلخانه‌ای بنا شد و تنظیم سناریوهای تغییر اقلیم آینده همگی بر اساس سطح تمرکز گازهای گلخانه‌ای در جو است. تولید سناریوهای اقلیمی لازمه پیشنگری اقلیم آینده است. در حال حاضر مهم‌ترین ابزار برای تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های گردش عمومی می‌باشند (Bazrafshan Moghadam, 2016). تغییر اقلیم با تغییر در دما و بارش بر چرخهٔ هیدرولوژیک، منابع آب در دسترس و تقاضای آب اثر می‌گذارد. در این راستا پیش‌نگری تغییرات دما و بارش توسط مدل های گزارش ششم ارزیابی تغییر اقلیم به دلیل افزایش دقت در برونداد آنها، می‌تواند کمک شایانی برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در دورهٔ آینده باشد (Ansari Mahabadi, Dehban, Zareian &Farrokhnia, 2022). ارتفاع از طریق تأثیر بر چرخه‌های آب و انرژی، نقش مهمی در تعدیل توزیع مکانی تغییرات اقلیمی در مناطق کوهستانی ایفا می‌کند. مناطق کوهستانی تحت تأثیر گرمایش انسانی، تغییرات سریع محیطی است که نرخ این تغییرات اغلب بر اساس ارتفاع طبقه‌بندی می‌شود (Pepin et al., 2025). اثر تغییر اقلیم در ارتفاعات ترکیه در نواحی منتخب مطالعه و نشان از اقلیم خشک در این نواحی دارد (Gur et al., 2024). ایران به لحاظ موقعیت طبیعی شرایط خاصی دارد، به‌گونه‌ای که فلات ایران از یک‌سو روی یکی از بزرگ‌ترین و فعال‌ترین کمربندهای کوهزایی جهان، یعنی کمربند آلپ–هیمالیا، قرار

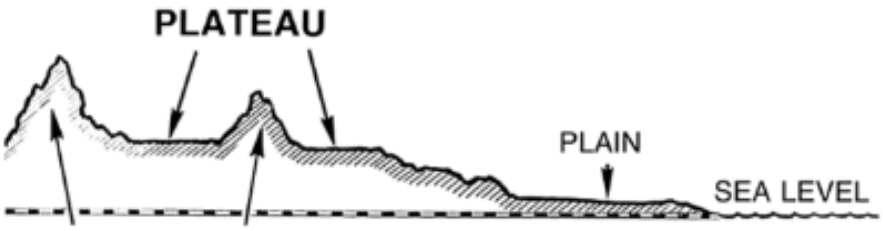
1- Representative Concentration Pathways

گرفته و از سوی دیگر در کانون بزرگ‌ترین کمربند بیابانی جهان واقع شده است؛ کمربندی که از صحرای بزرگ آفریقا در شمال این قاره آغاز شده و تا بیابان گُبی در مغولستانِ آسیای مرکزی امتداد دارد. فلات ایران دارای دو رشته کوه البرز در شمال با جهت غربی - شرقی و زاگرس با جهت شمال غربی - جنوب شرقی و ارتفاعات پراکنده در مناطق مرکزی است. از گذشته با توجه به این تنوع ارتفاعی، و از طرفی کاهش نزولات جوی، عمدتاً شهرهای ایران در مناطق پایکوهی و یا در کنار رودخانه‌ها در دشت‌ها و جلگه‌ها استقرار دارند. در واقع ارتفاع نقش مهمی در اقلیم ایران بازی می‌کند و بارش‌ها با ارتفاع در غالب مناطق ایران همبستگی مستقیمی دارند و با افزایش ارتفاع، بارش‌ها افزایش نشان می‌دهند (Alijani, 2002). ایران سرزمینی خشک و بیابانی با نزولات جوی بسیار کم بوده که میزان بارندگی در آن کمتر از یک سوم بارندگی در سطح دنیا است (Alizadeh Choubari & Najafi, 2017). پیش‌نگری بارش در شمال غرب کشور، حاکی از روند کاهشی بارش تا پایان قرن ۲۱ است (Mohammadi et al., 2012). پیش‌نگری بارش و دمای شرق ایران با مقیاس کاهی دینامیکی - آماری در سناریوی متوسط بررسی شد، تغییرات بارش شرق در آیندهٔ نزدیک بین ۱۱- تا ۱۵- درصد و در آیندهٔ دور بین ۸ - تا ۱۴/۹ + درصد نسبت به دوره دیدبانی است (Babaian, Karimian, Modirian, Flamarzi & Kouhi, 2021). پیش‌نگری شدت بارش ایران در اقلیم‌های مختلف با مدل منطقه‌ای RegCM4.5 انجام شد. انتخاب پیکربندی بهینه بر مبنای ایده طرحواره همرفت مبتنی بر طبقه اقلیمی، عملکرد مدل منطقه‌ای را در پیش بینی فصلی بارش ایران افزایش می‌دهد (Eghbali, Babaian, Azadi, Habibi Nokhandan & Zarrin, 2021). شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های اقلیمی CMIP5 و CMIP6 بر رواناب تمامی مدل‌ها، سناریوها و کاهش بارش (0.05–11.15 درصد) را در اغلب مدل‌ها و سناریوها نشان می‌دهد (Fallah Kalaki,Shokri Kouchak & Ramezani Etidali, 2021). مقایسهٔ مقادیر پیش‌نگری شدهٔ بارش و دما تحت سناریو RCP2.6 و RCP4.5 و RCP8.5 در سه دورهٔ ۲۰۱۸–۲۰۳۸ ، ۲۰۳۹–۲۰۶۸، ۲۰۶۹–۲۱۰۰ با دوره پایه (۱۹۸۷–۲۰۰۵)، در هر دو ایستگاه بابلسر و قراخیل، نشان‌دهندهٔ کاهش بارش متوسط سالانه و افزایش دمای متوسط سالانه تحت هر سه سناریوی انتشار نسبت به دوره پایه است (Mortazavifar, Mobin, Mokhtari,Ekrami&Rafiei Sardavii, 2018). ایران از لحاظ جغرافیایی در منطقه‌ای قرارگرفته که نه تنها به طور طبیعی و ذاتی بخش عمدهٔ آن جزو مناطق خشک و فراخشک محسوب می‌شود (حدود ۶۶ درصد)، بلکه جزو کشورهایی است که ضریب تأثیرپذیری آن از تغییر اقلیم بالاتر از متوسط جهانی است (Azare, 2016). بنابراین رویداد حدی کاهش بارش(خشکسالی) (Hajiabadi, Hassanpour, Yaghoubzadeh & Hamami, 2019) و رویدادهای حدی افزایش بارش(رخداد سیل) نشان از تغییر رژیم بارش آینده دارد (Khazaei, Khazaei &Thaqfian, 2019). از این رو، ضروری است بارش حدی و تاثیر گرمایش جهانی بر مقادیر حدی بارش مطالعه شود (Fattahi & Moghimi, 2019). در دهه‌های اخیر، در کشور روند بارش‌ها نزولی بوده است و با ادامه این روند، مشکل شدید کم آبی و افزایش مخاطره خشکسالی می‌باشد. بر این اساس، در این پژوهش سعی بر این است که با مطالعه و پیش‌نگری بارش در آینده با استفاده از برونداد مدل‌های گردش کلی، مقدار و روند آن در آینده برآورد گردد و چشم انداز نزولات جوی برای برآورد منابع آبی در آینده ارائه شود. این تحقیق، به دنبال ارزیابی و بررسی بارش‌های آینده در ایران با استفاده از مدل‌های آماری و داده‌های ایستگاهی از نقاط ارتفاعی مختلف ایران است تا با استفاده از نتایج آن یک دیدگاه کلی از شرایط بارشی غالب آینده حاصل شود. این تحقیق میزان و زمان بارش‌ها را به صورت سالانه و فصلی در مناطق ارتفاعی مختلف برآورد نموده و اثر تغییر اقلیم بر بارش پهنه‌های ارتفاعی را بررسی و ارزیابی می‌کند. بررسی پژوهش‌های مختلف نشان داد که نقش ارتفاع در تغییرات بارش ایران تحت سناریوهای اقتصادی- اجتماعی(SSP[1]) کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس پیش نگری الگوی رفتاری بارش‌ها در مناطق ارتفاعی ایران تحت سه سناریوی انتشار کم (توسعه پایدار)، میانی (توسعه میانی) و خیلی زیاد (توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی) در آینده بررسی شد.

1 - Shared Socioeconomic Pathway

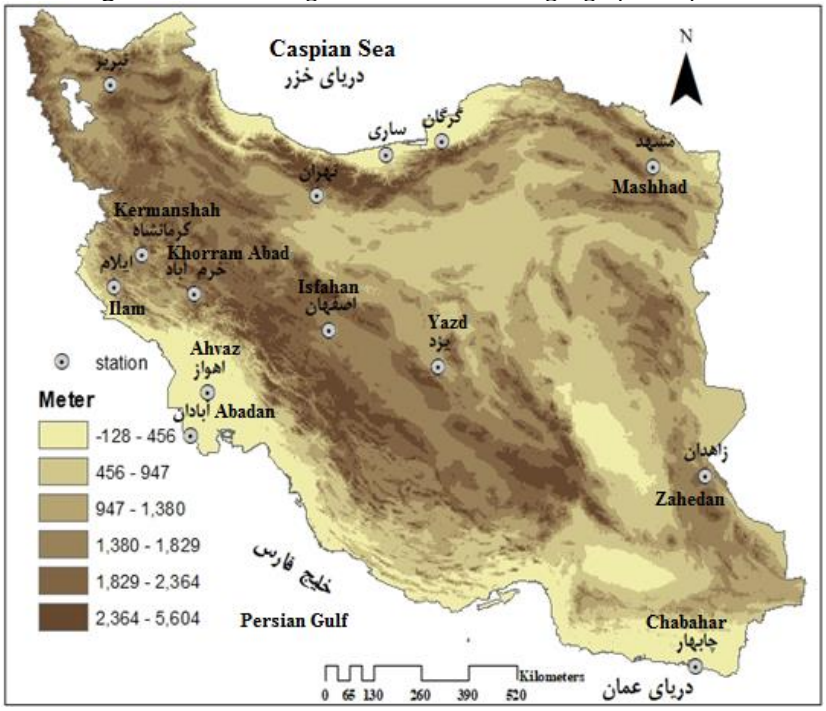
منطقهٔ مورد مطالعه

در این مطالعه از دو سری داده مشاهداتی و برونداد مدل‌های فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده استفاده شد. داده‌های مشاهداتی شامل ۱۴ ایستگاه (جدول۱) در مناطق ارتفاعی مختلف از ۲۰۱۴-۱۹۸۵ است، بر مبنای تقسیم‌بندی ایستگاه‌های سینوپتیک در پهنه‌های ارتفاعی ایران (Alijani, 2002)، مطالعه انجام شد (شکل۲). ایران به لحاظ موقعیت طبیعی شرایط خاصی دارد، طوری که فلات ایران بر روی بزرگترین رشته کوه (کمربند آلپ- هیمالیا) و در کانون بزرگترین کمربند بیابانی جهان از صحرا در شمال آفریقا تا گبی در مغولستان قرار دارد. فلات ایران با دو رشته کوه البرز در شمال با جهت غربی - شرقی و زاگرس با جهت شمال غربی- جنوب شرقی و ارتفاعات پراکنده در مناطق مرکزی است. از گذشته با توجه به این تنوع ارتفاعی (شکل ۱)، و از طرفی کاهش نزولات جوی، عمدتاً شهرهای ایران در مناطق پایکوهی و یا در کنار رودخانه‌ها در دشت‌ها و جلگه‌ها مستقر شدند. در واقع ارتفاع نقش مهمی در اقلیم ایران دارد و بارش‌ها با ارتفاع در غالب مناطق ایران همبستگی مستقیمی (افزایش ارتفاع = افزایش بارش) دارند. حال با پیشنگری آینده بارش‌ها در مناطق ارتفاعی، می‌توان به نوعی اثر تغییر اقلیم و بر بارش‌ها در ارتفاعات مختلف را آشکار کرد.



شکل۱- طرح شماتیک ارتفاع و پدیده‌های جغرافیایی

Fig. 1. Schematic diagram of elevation and geographical phenomena



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک

Fig. 2. Geographical location of synoptic stations

جدول ۱- ویژگی جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک

Table 1- Geographical characteristics of synoptic stations

منطقه ارتفاعی Altitude zone		ایستگاه Station	کد code	طول Lon	عرض Lat	ارتفاع Height	بارش(میلیمتر)Precipitation(mm) سالانه Annual	فصل Season بهار Spring	تابستان Summer	پاییز Autumn	زمستان Winter
High		تبریز Tabriz	40706	38.07	46.28	1361	249	94	15	70	69
		کرمانشاه Kermanshah	40766	34.32	47.07	۱۳۱۹	419	75	4	148	192
کوهپایه Foothills	داخلی In	مشهد Mashhad	40745	36.29	59.6	999.2	246	70	5	48	122
		تهران Tehran	40754	35.68	51.31	1191	236	48	5	74	109
		اصفهان Esfahan	40802	32.74	51.87	۱۵۵۲	107	24	2	31	49
	بیرونی Out	خرم آباد Khoramabad	40782	33.26	48.17	۱۱۴۸	468	90	1	163	214
		ایلام Ilam	40780	33.63	46.41	1337	551	79	3	186	293
مرکزی Central		یزد Yazd	40821	31.89	54.35	۱۲۳۰	54	7	0	16	31
		زاهدان Zahedan	40856	29.48	60.86	1370	75	14	2	18	42
پست Coastal Lowland	شمالی North	ساری Sari	40759	36.32	52.59	23	740	108	123	309	222
		گرگان Gorgan	40738	36.84	54.43	0	519	100	79	168	171
	جنوبی South	آبادان Abadan	40831	30.36	48.37	6.6	152	72	16	0	64
		چابهار CHabahar	40898	25.29	60.64	8	122	64	10	6	43
		اهواز Ahvaz	40811	31.31	48.67	22.5	218	102	19	0	96

دورهٔ مورد مطالعه در گذشته دوره ۲۰۱۴- ۱۹۸۵ انتخاب شد تا با دورهٔ تاریخی گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم تطابق داشته باشد. داده‌های مشاهداتی از سازمان هواشناسی کشور اخذ شدند. داده‌های مدل‌های اقلیمی برای دو دوره تاریخی ۲۰۱۴-۱۹۸۵ و دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۱ از پایگاه ESGF[1] استخراج شدند. داده‌های دورهٔ آینده (۲۰۲۱-۲۱۰۰) سه طیف سناریوی انتشار کم (SSP1-2.6)، انتشار میانه (SSP2-4.5) و انتشار خیلی زیاد (SSP5-8.5) را پوشش می‌دهند. همه داده‌های فوق در مقیاس روزانه می‌باشند.

مواد و روش‌ها

برونداد مدل‌های گردش کلی در مطالعات در مقیاس منطقه‌ای و یا محلی نیازمند مقیاس‌کاهی می‌باشند. برای مقیاس‌کاهی داده‌های مشاهداتی در دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۵ با داده‌های تاریخی مدل در دورهٔ مشابه مقایسه شده و برونداد مدل در دوره تاریخی اصلاح شد. معادلات مستخرج در این دوره برای تصحیح برونداد مدل‌ها در آینده تحت سناریوهای مختلف استفاده شد. به دلیل تعدد مدل‌های گردش کلی، مدل‌ها فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده (CMIP6[2]) غربالگری شدند، به این صورت که ابتدا شرط در دسترس بودن داده‌های تاریخی و سناریو بر مدل‌های اعمال شد، لذا آن گروه از مدل‌هایی که یکی از داده‌های تاریخی یا سناریو را نداشتند، از فرآیند انتخاب حذف شدند. سپس فیلتر واریته (ripf) شبیه‌سازی مدل اعمال شد و در نهایت از بین مدل‌های موجود مدل‌های سامانه زمین (ESM[3]) که در مقایسه با سایر مدل‌های فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده دارای قابلیت‌های

1 - Earth Systam Grid Federation
2 - Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
3 - Earth System Models

بیشتری در شبیه‌سازی فرآیندهای سطحی، بیوسفر، آئروسل‌ها و . .. می باشند، انتخاب شد. تعداد مدل‌های در دسترس ۷ مدل برآورد شد. از بین هفت مدل یادشده، چهار مدل انتخاب شدند که دلیل انتخاب این چهار مدل این است که آنها از نوع مدل‌های سامانهٔ زمین هستند که نسخه با کیفیت بهتر از مدل‌های گردش عمومی (GCM[1]) هستند، زیرا مولفه‌های بیشتری از سامانه اقلیم را در فرآیند مدل‌سازی در نظر می‌گیرند و ضمناً دارای تفکیک مکانی بیشتری در مقایسه با مدل‌های گردش عمومی هستند. به همین دلیل مدل‌های CMCC-ESM2، MPI-ESM1-2-HR , GFDL-ESM4, NorESM2-MM به عنوان مدل‌های نهایی انتخاب شدند. برای انجام محاسبات و مقیاس کاهی از نرم افزار CMhyd استفاده می‌شود. از نرم افزار GrADS برای کار با داده‌های با فرمت nc و نوشتن اسکریپت در محیط gs و از نرم افزارهای SPSS و Excel برای بررسی آماری آماری و ترسیم نمودارها استفاده شد. پس از دانلود و دریافت فایل‌های چهار مدل (CMCC-ESM2، GFDL-ESM4، MPI-ESM1-2-HR، NorESM2-MM) با استفاده از فرامین CDO بخش مورد نظر ایران را از فایل‌ها جدا کرده تا بهتر و دقیق‌تر محدودهٔ مورد نظر مطالعاتی ارزیابی شود (در حال حاضر نیازی به این کار نیست زیرا پایگاه داده کوپرنیک[2] امکان دانلود داده‌های فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده برای محدوده‌های زمانی و مکانی دلخواه را با حجم بسیار کم فراهم کرده است). سپس داده‌های هر ایستگاه طبق چهار مدل به صورت داده‌های TXT استخراج شد و بعد از فرآیند مرتب سازی داده‌ها توسط نرم افزار CMhyd مقیاس‌کاهی شد. در مرحله داده‌های آینده تحت سناریوهای توسعه پایدار، توسعه میانه و توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی مرتب سازی شدند و تا سال ۲۱۰۰ داده‌های مقیاس کاهی شده طبق سناریوهای نامبرده در هر ایستگاه و مدل تحلیل شدند. پنج روش برای مقیاس‌کاهی برونداد بارش، چهار مدل از مجموعه مدل‌های فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده انتخاب شد که نتایج در جدول ۲ به عنوان نمونه برای ایستگاه هواشناسی مشهد آورده شده است. بر اساس نتایج، روش‌های مقیاس‌کاهی به ترتیب بر اساس توانمندی آنها در شبیه‌سازی پنج نمایه آماری همبستگی، RMSE، انحراف استاندارد، صدک ۹۵ بارش برای چهار مدل فوق مرتب شدند. نتایج نشان دادند که از بین چهار روش مقیاس‌کاهی، دو روش Linear Scaling(LS) و Local Precipitation Intensity(LI) دارای توانمندی بیشتری در مقایسه با دو روش دیگر دارند؛ به طوری که روش‌های LS و LI به ترتیب در ۶۳ و ۶۷ درصد موارد پنج شاخص آماری فوق را بهتر از سایر روش‌هایش شبیه‌سازی کرده اند در حالی که این مقدار در مورد دو شاخص Distribution Mapping(DM) و Power Transformation(PT) به ترتیب ۲۱ و ۱۷ درصد است. نتایج فوق با قدری انحراف برای سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه نیز صادق است بر این اساس دو روش LS و LI به عنوان روش‌های مقیاس‌های مورد استفاده قرار گرفتند.

بعد از فرایند مقیاس‌کاهی و استخراج داده‌های آینده در سه سناریو، مرتب سازی داده‌ها تا ۱۰۰ سال آینده و مقیاس کاهی برروی سناریوهای نامبرده در هر ایستگاه و مدل انجام شد. در گام بعدی تحقیق در نرم افزار اکسل پارامترهای مختلف را در نظر گرفته تا بارش‌ها در آینده ارزیابی شود؛ بدین منظور داده‌های آینده را به دو دوره تقسیم بندی شد، یک دوره آینده نزدیک که از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ (دهه ۲۰۳۰) و دوره آینده دور که از سال ۲۰۶۱ تا ۲۰۹۰ (دهه ۲۰۷۰) را شامل می‌شود و سپس با تقسیم‌بندی این دو دوره، آینده دور و نزدیک به مقایسه این دو دوره با دوره گذشته ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴ (دهه ۲۰۰۰) مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی، نمودارهای هر ایستگاه برای دوره مشاهداتی و سه سناریوی آینده ترسیم شدند که بر اساس آن به پیش‌نگری بارش‌ها در بازه‌های آینده دور، نزدیک و مقایسه آن با بارش‌های گذشته پرداخته شد. در این تحقیق در نقاط ارتفاعی مختلف کشور شامل: ناحیه (1340m)، ناحیه کوهپایه‌ای بیرونی(1247m)، ناحیه کوهپایه‌ای داخلی(1242m)، ناحیه پست سواحل شمالی(12m)، ناحیه پست سواحل جنوبی (12m) و نواحی مرکزی (1300m)، تغییرات بارش‌ها بر اساس سناریوهای سناریوهای اقتصادی – اجتماعی مطالعه شد. سپس با استفاده از آزمون تی - استیودنت و سطح معنی دار۰.۰۵ درصد معناداری روند بارش‌ها تعیین شد. انتخاب آماره تی- استیودنت به دلیل نرمال بودن توزیع اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه در سطح معناداری ۰/۰۵ و یک مورد در سطح ۰/۱۰ بوده است.

1 - Global Climate Model
2 - https://cds.climate.copernicus.eu

نتایج و بحث

در این بخش پیش‌نگری ناحیه‌ای بارش کشور بر اساس داده‌های بارش تصحیح اریبی شده برونداد مدل‌های فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده منتخب در دورهٔ آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و دور (۲۰۶۱-۲۰۹۰) طبق سه سناریوی توسعه پایدار، توسعه میانه و توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی در دو مقیاس زمانی سالانه و فصلی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۲- توانمندی روش‌های مختلف مقیاس‌کاهی بارش در دوره مشاهداتی ۲۰۱۴-۱۹۸۵، ایستگاه مشهد

Table 2- Performance of different precipitation downscaling methods during the observational period (1985–2014) at Mashhad station

روش مقیاس‌کاهی Downscaling method	میانگین(م.م.بر روز) Mean (mm day^{-1})	RMSE	انحراف استاندارد (نسبی) Standard deviation (relative)	صدک 95 (م.م.) 95th percentile (mm)
مشاهداتی	0.66	-	2.89	4.1
LS	0.65	3.87	0.93	4.11
LI	0.63	3.76	0.96	4.14
PT	0.64	3.89	1.07	3.88
DM	0.62	4.49	1.21	3.59

ناحیه مرتفع (ارتفاع ۱۳۴۰ متر)

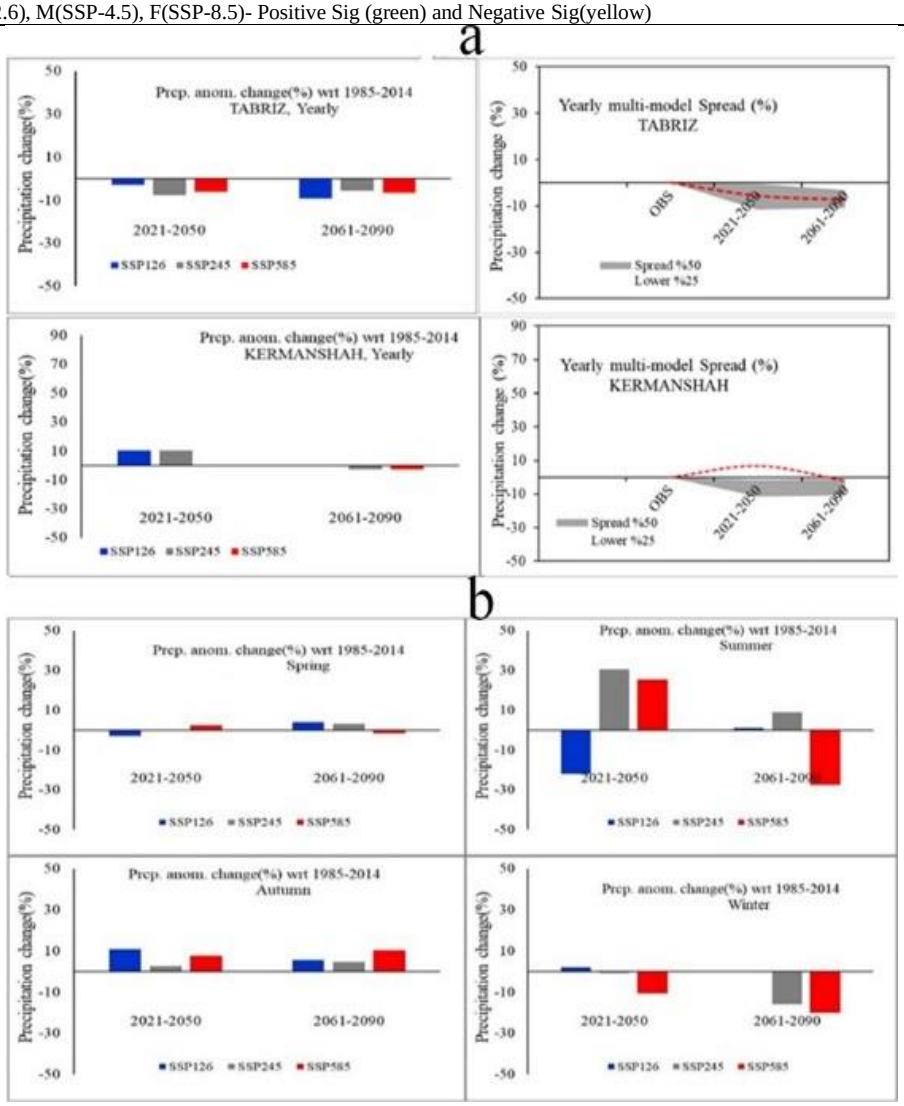
تغییرات سالانه بارش در دو ایستگاه منتخب ناحیه مرتفع (تبریز و کرمانشاه) را نشان می‌دهد (شکل۳ و جدول۳)، بارش ایستگاه تبریز در همه سناریوها و در هر دو دوره آینده نسبت به گذشته ۵ تا ۱۰ درصد کاهش دارد. در ایستگاه کرمانشاه در دو سناریوی توسعه پایدار و توسعه میانه در دوره نزدیک، افزایش بارش خواهند داشت، ولی در دوره آینده دور بارش‌ها کاهش می‌یابند. به طور میانگین، ناحیه مرتفع در مقیاس سالانه با کاهش بارش ها در آینده نزدیک و دور در سناریوهای مختلف روبرو خواهد شد. همچنین بارش فصل بهار ایستگاه تبریز در سناریوی توسعه پایدار و میانه در دوره آینده دور(۲۰۹۰-۲۰۶۱)، افزایش خواهد داشت ولی این افزایش در سطح ۰.۰۵ معنادار نیست و کاهش بارش این ایستگاه طبق سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی معنادار نیست. اما در کرمانشاه در همه سناریوها بارش فصل بهار افزایش غیر معنی دار را نشان می دهد. به طور کلی درکل ناحیه، بارش ها در سناریوی توسعه پایدار و توسعه میانه دوره آینده دور، افزایش و در دیگر سناریوها کاهش غیر معنی دار مشهود است. بارش‌های تابستان در ایستگاه تبریز به جر در سناریوی توسعه پایدار دوره آینده دور، کاهش غیر معنی دار است، اما در کرمانشاه در همه سناریوها افزایش دارد و تنها در سناریوی انتشار میانه در دوره آینده دور معنی دار است. بارش‌های پاییز در تبریز در اغلب سناریوها روند افزایشی دارد ولی هیچ یک در سطح ۰.۰۵ معنادار نیستند. در ایستگاه کرمانشاه تنها در دوره آینده نزدیک طبق سناریوی توسعه پایدار افزایش معنادار بارش پیش‌نگری شده است، اما در همه سناریوهای دیگر روند کاهشی غیرمعنادار دیده می‌شود. در کل ناحیه نیز اگر چه اغلب روندهای افزایش بارش پیش‌نگری شده است، اما تنها افزایش بارش طبق سناریوی توسعهٔ پایدار در آیندهٔ نزدیک معنادار است، در حالی که وضع موجود انتشار گازهای گلخانه‌ای در کره زمین در حال حاضر و تا میانه آینده نزدیک طبق سناریوی میانه تا توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی مورد انتظار است. بارش‌های زمستان تبریز در دو دوره آینده ترکیبی از روندهای افزایشی و کاهشی است، اما هیچ یک معنادار نیستند. در کرمانشاه بارش‌های زمستان در اغلب سناریوها کاهشی است، و کاهش پیش‌نگری شده بارش‌ها طبق سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی در هر دو دوره معنادار است. در مجموع در این ناحیه ارتفاعی، در اکثر سناریوها بارش روند کاهشی دارد ولی این کاهش تنها در دوره آینده دور و طبق سناریوی انتشار میانه معنادار است.

جدول ۳- تغییرات بارش در مقیاس سالانه و فصلی در ناحیه مرتفع

Table 3- Annual and seasonal precipitation variations in the high-altitude zone

دوره Period	سناریو	تبریز(Tabriz)					کرمانشاه(Kermanshah)					ناحیه مرتفع				
		سال	فصل Season				سال	فصل Season				سال	فصل Season			
			ب	ت	پ	ز		ب	ت	پ	ز		ب	ت	پ	ز
۲۰۲۱-۲۰۵۰	ک	–	–	–	+	+	+	+	+	+	+	–	–	–	+	+
	م	–	–	–	–	+	+	+	+	–	+	–	–	–	–	–
	خ	–	–	–	+	+	–	+	+	+	–	–	–	–	+	–
۲۰۷۱-۲۰۹۰	ک	–	+	+	+	+	–	+	+	+	–	–	–	+	+	–
	م	–	+	–	+	–	–	+	+	–	–	–	+	+	+	–
	خ	–	–	–	+	–	–	+	+	–	–	–	–	–	+	–

سناریو انتشار: کم(توسعه پایدار)، متوسط (توسعه میانه)، خیلی زیاد (توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی)- معنی‌داری مثبت (سبز)، معنی‌داری منفی (زرد)
Scenario: P(SSP-2.6), M(SSP-4.5), F(SSP-8.5)- Positive Sig (green) and Negative Sig(yellow)



شکل ۳- (a)پیش‌نگری بارش ایستگاه منتخب (٪) (چپ)، محدوده عدم قطعیت(٪)(راست)، (b) پیشنگری فصلی ناحیه مرتفع

Fig. 3. (a) Precipitation forecast at the selected station (%) (left) and uncertainty range (%) (right), (b) Seasonal forecast for the high-altitude zone

ناحیه کوهپایه داخلی (ارتفاع ۱۲۴۷ متر)

پیش‌نگری بارش برای ناحیه کوهپایه‌ای داخلی در مقیاس سالانه، نشان می‌دهد (شکل۴ و جدول۴)، بارش ایستگاه مشهد طبق سناریوی توسعه پایدار در هر دو دوره آینده نزدیک و دور افزایش بارش معنادار است و در دیگر سناریوها روند کاهشی بوده ولی معنادار نیستند. در ایستگاه اصفهان فقط در دوره آینده نزدیک و طبق سناریوی توسعه پایدار افزایش بارش معنادار است ولی در سایر سناریوها روند افزایش بارش معنادار نیستند. در ایستگاه تهران در هیچ یک از سناریوها تغییرات بارش معنادار نیست، هر چند طبق سناریوی توسعه پایدار در آینده نزدیک روند افزایش مشاهده می‌شود. به طور کلی در این ناحیه ارتفاعی، تنها در سناریوی توسعه پایدار و در آینده نزدیک افزایش بارش معنادار است و در سایر سناریوها، تغییرات بارش معنادار نیستند. در مقیاس فصلی، تغییرات بارش فصل بهار در هیچ ایستگاهی در سناریوهای مورد بررسی معنادار نیست. با این حال طبق سناریوی توسعه پایدار، در همه دوره‌ها روند افزایش بارش و طبق سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی در همه دوره‌ها روند کاهش بارش دیده می‌شود که در سطح ۰/۰۵ معنادار نیست. در فصل تابستان در اغلب سناریوها روند بارش در ایستگاه‌های مشهد و تهران کاهشی بوده ولی معنادار نیست، اما در ایستگاه اصفهان روند بارش در همه سناریوها افزایشی است که تنها در دورهٔ آینده دوره طبق سناریوی میانه افزایش معنادار نیست. در مجموع تغییرات بارش فصل تابستان در این ناحیه بارشی معنادار نیست. در بین فصول مختلف، بیشترین افزایش بارش معنادار این ناحیه ارتفاعی در فصل پاییز برآورد شده است، بطوریکه طبق سناریوی توسعه پایدار در هر دو دوره وطبق سناریوی میانه فقط در آینده نزدیک روند افزایش بارش معنادار است، اما در سایر سناریوها افزایش بارش معنادار نیست. از بین سه ایستگاه واقع در این ناحیه، بیشترین افزایش بارش برای ایستگاه اصفهان پیش‌نگری شده است. در فصل زمستان، طبق سناریوی توسعه پایدار افزایش بارش در آینده نزدیک معنادار است و در سایر سناریوها تغییرات بارش معنادار نیست. همچنین افزایش بارش طبق سناریوی توسعه پایدار و در هر دو دوره، در ایستگاه مشهد معنادار است و تنها در ایستگاه اصفهان کاهش بارش در آینده دور طبق سناریوی میانه، معنادار است.

ناحیهٔ کوهپایه بیرونی (ارتفاع ۱۲۴۲متر)

در مقیاس سالانه، پیش نگری بارش‌های سالانه در هر سه سناریو و در هر دو دوره مطالعاتی در این ناحیه افزایش را نشان می‌دهد، که افزایش طبق سناریوی توسعه پایدار و طبق سناریوی میانه در آینده نزدیک معنادار است. مقادیر افزایش بارش ها بین ۱۰ تا ۴۰ درصد نسبت به دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) متغیر است (جدول۵ و شکل۵). مقادیر و سناریوهای افزایش بارش در ایستگاه ایلام بیش از خرم‌آباد است. در مقیاس فصلی، بیشترین افزایش بارش برای فصل بهار پیش‌نگری شده است که در ایستگاه ایلام در همه سناریوها افزایشی و عمدتاً معنی‌دار است، اما ایستگاه خرم آباد، سناریوی توسعه میانه نزدیک و توسعه پایدار و توسعه میانه دور، افزایش معنی‌دار و در دیگر سناریوها کاهش دارد. به طور کلی نیز بارش‌های بهار، به جز در توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی نزدیک و دور، در دیگر سناریوها افزایش معنی‌داری دارند. بارش‌های تابستان خرم آباد افزایش دارد که در سناریوی میانه آینده دور معنی‌دار می‌باشد، اما در ایستگاه ایلام، در اغلب سناریوها روند بارش کاهشی برآورد شده است که در هیچ یک تغییرات معنادار نیستند. به طور کلی نیز در این ناحیه ارتفاعی، بارش‌های تابستانه در سناریوی میانه و توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی دور افزایشی معنی‌دار و در سناریوهای نزدیک کاهشی است. بارش‌های فصل پاییز در دو ایستگاه متفاوت است، چنانکه در خرم آباد، در تمام سناریوها افزایشی است که تنها در سناریوی توسعه پایدار آینده نزدیک، افزایش معنی‌دار است، اما در ایلام بارش‌ها در تمامی سناریوها کاهشی است که تنها در سناریوی میانه دوره نزدیک کاهش معنی‌دار می‌باشد. به طور کلی نیز بارش‌های این فصل در منطقه کوهپایه بیرونی کاهشی است. بارش‌های زمستان در ایستگاه خرم آباد در همه سناریوها کاهشی بوده ولی در هیچ یک معنادار نیستند، اما در ایستگاه ایلام، بارش های زمستان در همه ایستگاهها دارای روند افزایشی است که افزایش تنها در آینده دور معنادار نیست. در کل ناحیه نیز عمدتاً در همه سناریوها به جز توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی، افزایش بارش زمستان حادث می‌شود که افزایش در هیچ یک از سناریوها معنادار نیست

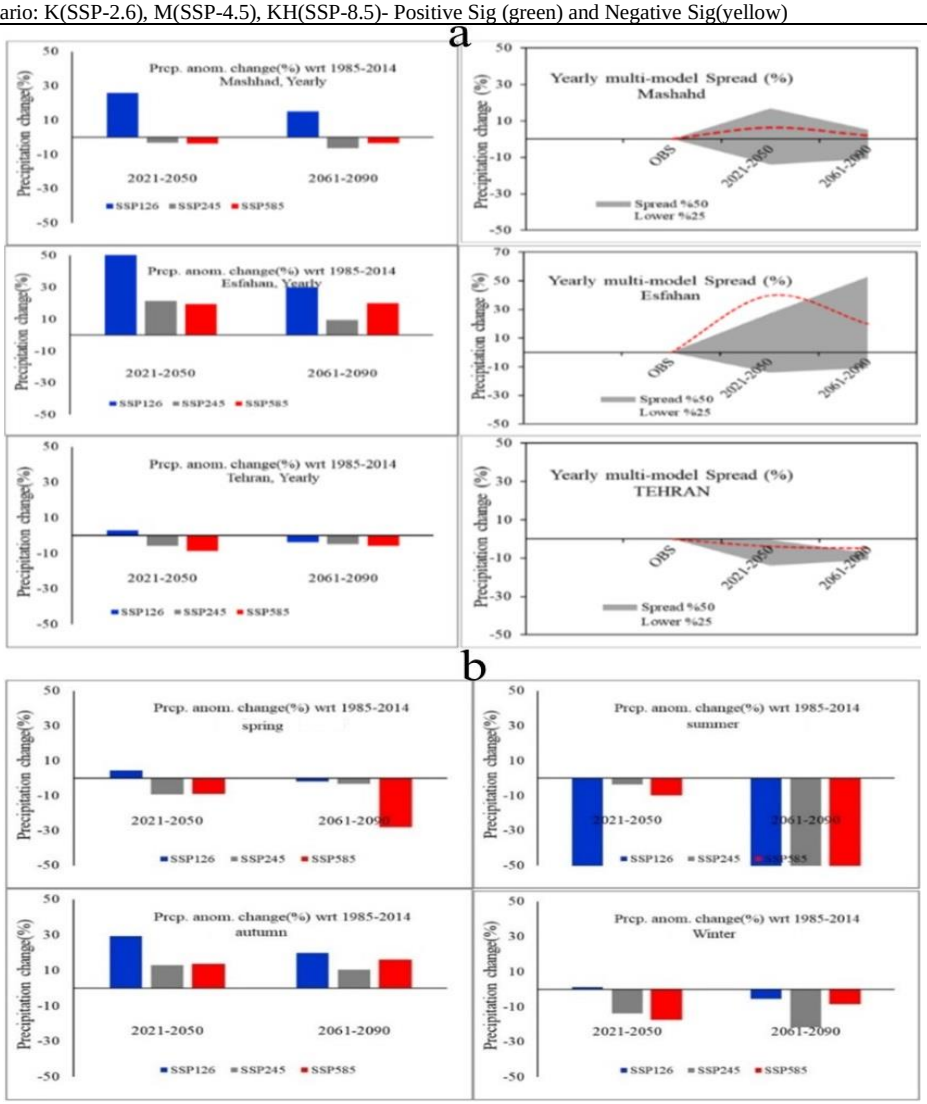
جدول ۴- تغییرات بارش در مقیاس سالانه و فصلی در ناحیهٔ کوهپایه داخلی

Table 4- Annual and seasonal precipitation variations in the inner piedmont zone

دوره Period	سناریو	مشهد(Mashhad)					تهران(Tehran)					اصفهان(Esfahan)					ناحیه کوهپایه داخلی				
		سال	فصل Season				سال	فصل Season				سال	فصل Season				سال	فصل Season			
			ب	ت	پ	ز		ب	ت	پ	ز		ب	ت	پ	ز		ب	ت	پ	ز
۲۰۲۱- ۲۰۵۰	ک	+	+	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+	+
	م	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	-
	خ	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	-
۲۰۶۱- ۲۰۹۰	ک	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+	+	-	+	-
	م	-	-	+	+	-	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+	+	-
	خ	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	-	+	-	-	+	-	+	+

سناریو انتشار: کم(توسعه پایدار)، متوسط(توسعه میانه)، خیلی زیاد(توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی)- معنی داری مثبت(سبز)، معنی داری منفی(زرد)

Scenario: K(SSP-2.6), M(SSP-4.5), KH(SSP-8.5)- Positive Sig (green) and Negative Sig(yellow)



شکل ۴- (a)پیش‌نگری بارش ایستگاه منتخب (٪) (چپ) و محدوده عدم قطعیت(٪)(راست)، (b) پیشنگری فصلی ناحیه کوهپایه داخلی

Fig. 4. (a) Precipitation forecast at the selected station (%) (left) and uncertainty range (%) (right), (b) Seasonal forecast for the inner piedmont zone

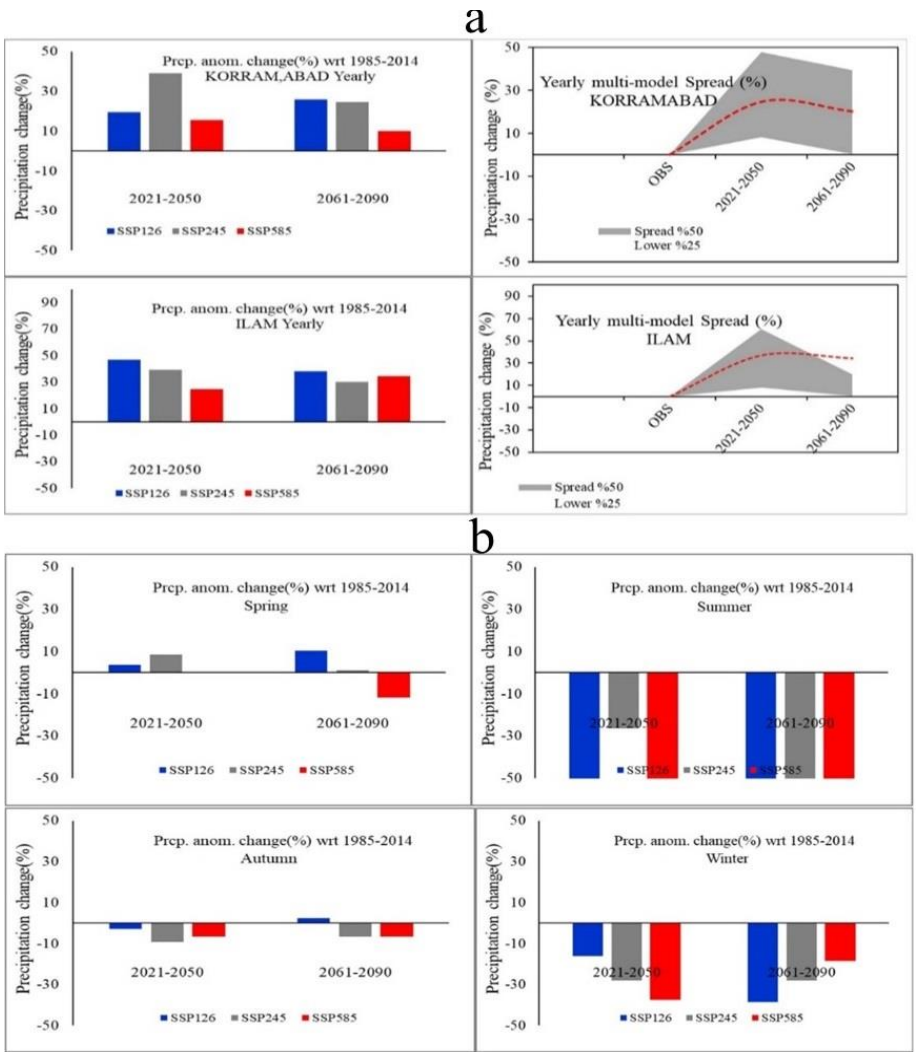
جدول ۵- تغییرات بارش در مقیاس سالانه و فصلی در ناحیه کوهپایه بیرونی

Table 5- Annual and seasonal precipitation variations in the outer piedmont zone

دوره Period	سناریو	خرم آباد (KHoramabad)					ایلام (Ilam)					ناحیه کوهپایه بیرونی				
		سال Year	فصل Season				سال Year	فصل Season				سال Year	فصل Season			
			ب	ت	پ	ز		ب	ت	پ	ز		ب	ت	پ	ز
۲۰۵۰-۲۰۲۱	ک	+	−	+	+	−	+	+	−	−	+	+	+	−	+	+
	م	+	+	+	+	−	+	+	+	−	+	+	+	+	−	+
	خ	+	−	+	+	−	−	+	−	−	+	+	−	−	−	−
۲۰۹۰-۲۰۶۱	ک	+	+	+	+	−	+	+	−	−	+	+	+	−	−	+
	م	+	+	+	+	−	+	+	+	−	+	+	+	−	+	+
	خ	+	−	+	+	−	−	+	+	+	+	+	−	−	+	−

سناریو انتشار: کم(توسعه پایدار)، متوسط(توسعه میانه)، خیلی زیاد(توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی)- معنی داری مثبت(سبز)، معنی داری منفی(زرد)

Scenario: K(SSP-2.6), M(SSP-4.5), KH(SSP-8.5)- Positive Sig (green) and Negative Sig(yellow)



شکل۵- (a) پیش‌نگری بارش ایستگاه منتخب (٪) (چپ) و محدوده عدم قطعیت (٪)(راست)، (b) پیشنگری فصلی ناحیه کوهپایه بیرونی

Fig. 5. (a) Precipitation forecast at the selected station (%) (left) and uncertainty range (%) (right), (b) Seasonal forecast for the outer piedmont zone

ناحیه مرکزی (ارتفاع ۱۳۰۰ متر)

بارش‌های این ناحیه ارتفاعی در مقیاس سالانه (جدول۶ و شکل ۶) افزایشی بین ۵ تا ۱۰ درصد دارد که در سناریوی توسعه پایدار آینده نزدیک، افزایش بارش معنی‌دار و در سایر سناریو تغییرات معنادار نیست. چنانکه در ایستگاه یزد، به جز سناریوی میانه دوره آینده دور در دیگر سناریوها افزایش غیر معنی‌داری دارد و در ایستگاه زاهدان بارش سالانه در همه سناریوها، افزایش ولی تنها در سناریوی توسعه پایدار آینده نزدیک، معنی‌دار می‌باشد. در این دوره بارش‌ها بین ۱۰ تا ۳۰ درصد در سناریوهای مختلف افزایش دارند. در مقیاس فصلی، بارش‌های فصل بهار ناحیه مرکزی در تمام سناریوها، افزایشی است ولی تنها در سناریوی توسعه پایدار دوره آینده نزدیک افزایش معنادار است و در سایر سناریوها افزایش بارش‌ها معنادار نیستند. چنانکه در یزد بارش‌های فصل بهار عمدتاً در سناریوهای محتلف افزایش غیر معنی‌داری دارد، اما در زاهدان بارش‌ها در همه سناریوها، افزایش و در سناریوی توسعه پایدار نزدیک، معنی‌دار می باشد. بارش‌های فصل تابستان در این ناحیه، به طور کلی در سه سناریوی دوره آینده نزدیک افزایشی و در سناریوهای دوره آینده دور، کاهشی می‌باشد، اما هیچ یک از آنها در سطح 0.5 معنادار نیستند. چنانکه در یزد، بارش‌ها به جز در سناریوی توسعه پایدار و توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی دوره آینده دور، در سایر دوره- سناریوها افزایش غیرمعنی‌داری داشته و در زاهدان در همه سناریوها افزایش غیر معنی‌دار بارش‌ها مشهود است. در این ناحیه، بارش‌های پاییز در تمامی دوره - سناریوها افزایشی است، اما در نیمی از دوره - سناریوها افزایش بارش معنادار است، چنانکه در یزد و زاهدان در همه سناریوها افزایش بارش‌ها پاییزه حادث شده ولی در زاهدان این افزایش‌ها معنی‌دار است. بارش‌های زمستان به طورکلی در این ناحیه، به جز در سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی دوره آینده دور، افزایشی غیر معنی‌دار است. چنانکه در بارش‌های زمستان یزد و زاهدان بجز در سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی دوره آینده دور که کاهشی است، در دیگر سناریوها افزایشی می‌باشد، اما در هیچکدام از ایستگاه‌ها، معنی‌دار نیست.

ناحیهٔ پست شمالی (ارتفاع ۱۲ متر)

تغییرات بارش‌ها غالب سناریوها در مقیاس سالانه، به جز در سناریوی توسعه پایدار دوره آینده نزدیک، کاهشی است که در سناریوی میانه دوره آینده دور، کاهش بارش معنی‌دار نیز می‌باشد (جدول ۷ و شکل۷). چنانکه کاهش بارش‌های ساری، در آینده دوره عمدتاً معنادار است، اما در گرگان به جز در سناریوی توسعهٔ مبتنی بر سوخت فسیلی دوره آینده نزدیک و سناریوی میانه دوره آینده دور، که بارش‌ها کاهشی است در دیگر سناریوها، افزایش نشان می‌دهد. در مقیاس فصلی، به طور کلی بارش‌های فصل بهار در این ناحیه هر دو نوع تغییرات افزایشی و کاهشی دیده می‌شود ولی هیچ یک از این تغییرات معنادار نیستند. چنانکه در ساری، بارش‌های فصل بهار عمدتاً افزایشی به جز در سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی دوره آینده دور، اما در گرگان در دوره نزدیک کاهشی و در دوره آینده دور افزایش دارد. به طور کلی بارش‌های تابستان در کل ناحیه، کاهشی معنی‌دار است. در فصل تابستان بارش‌های ساری در همه سناریوها کاهشی و عمدتاً معنی‌دار می‌باشد. در گرگان نیز بارش‌ها به جز در سناریوی میانه آینده نزدیک و سناریوی توسعهٔ پایدار دوره آینده دور، در بقیه سناریوها کاهشی است. تغییرات بارش فصل پاییز در هیچ سناریویی معنادار نیست و عمدتاً گرایش به کمتر از نرمال دارد. در ساری مشابه روند کلی این ناحیه، روند بارش‌ها عمدتاً کاهشی، اما در گرگان به جز در سناریوی میانه دوره آینده دور، در سایر سناریوها، بارش افزایش غیر معنی‌دار دارد. به طور کلی بارش‌های زمستان نیز در این ناحیه به جز در سناریوی توسعه پایدار و میانه در دوره آینده نزدیک، در سایر سناریوها کاهشی است. در مجموع در این ناحیه و همچنین در هر دو ایستگاه مورد مطالعه روند بارش‌ها عمدتاً کاهشی است ولی هیچ یک از روندها معنادار نیستند.

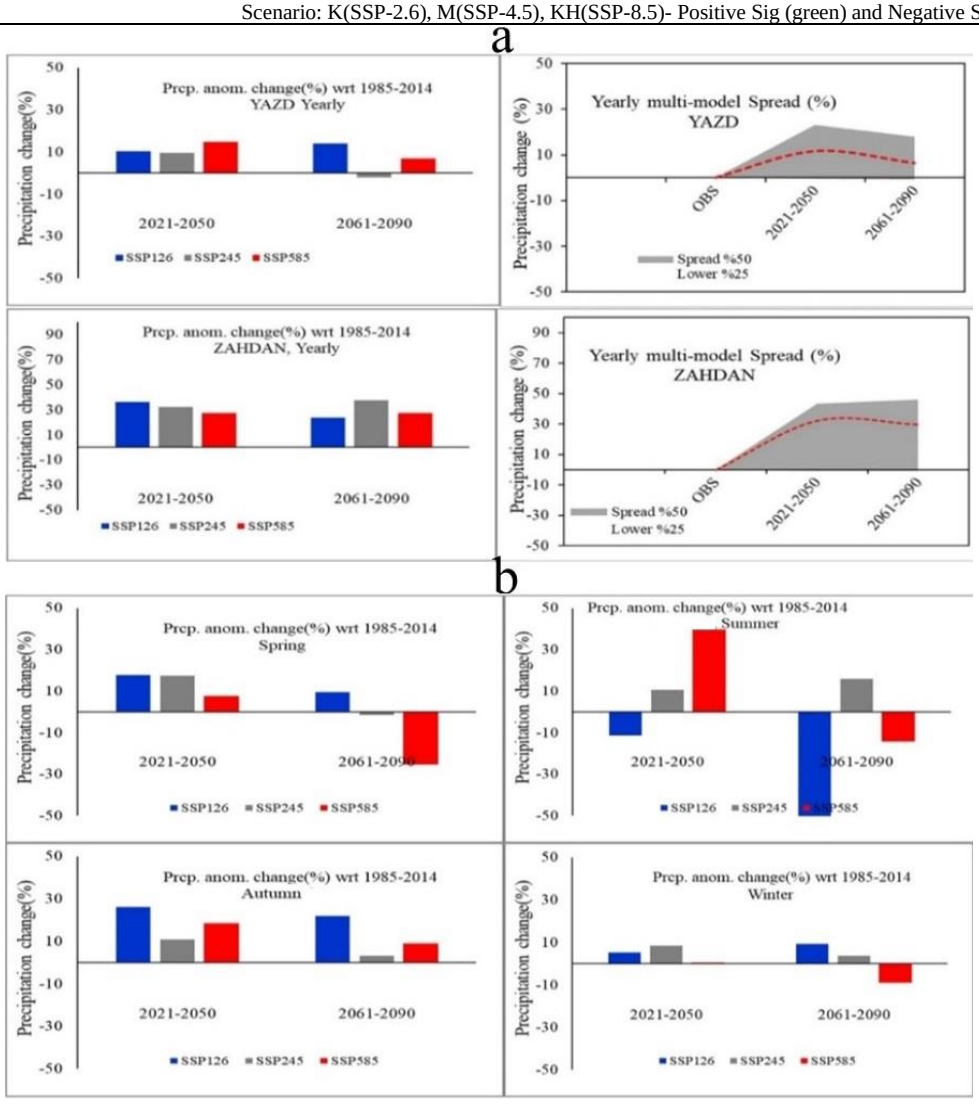
جدول ۶- تغییرات بارش در مقیاس سالانه و فصلی در ناحیه مرکزی

Table 6- Annual and seasonal precipitation variations in the central zone

دوره Period	سناریو	یزد (Yazd)					زاهدان (Zahedan)					ناحیه مرکزی				
		سال	فصل Season				سال	فصل Season				سال	فصل Season			
			ب	ت	پ	ز		ب	ت	پ	ز		ب	ت	پ	ز
۲۰۵۰-۲۰۲۱	ک	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	م	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	خ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
۲۰۹۰-۲۰۶۱	ک	+	−	−	+	+	+	+	+	+	+	+	−	−	+	+
	م	−	+	+	+	+	+	+	+	+	+	−	+	−	+	+
	خ	+	+	−	+	−	+	+	+	+	−	+	+	−	+	−

سناریو انتشار: کم(توسعه پایدار)، متوسط(توسعه میانه)، خیلی زیاد(توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی)- معنی داری مثبت(سبز)، معنی داری منفی(زرد)

Scenario: K(SSP-2.6), M(SSP-4.5), KH(SSP-8.5)- Positive Sig (green) and Negative Sig(yellow)



شکل۶- (a) پیش‌نگری بارش ایستگاه منتخب (٪) (چپ) و محدوده عدم قطعیت (٪)(راست)، (b) پیشنگری فصلی ناحیه مرکزی

Fig. 6. (a) Precipitation forecast at the selected station (%) (left) and uncertainty range (%) (right), (b) Seasonal forecast for the central zone

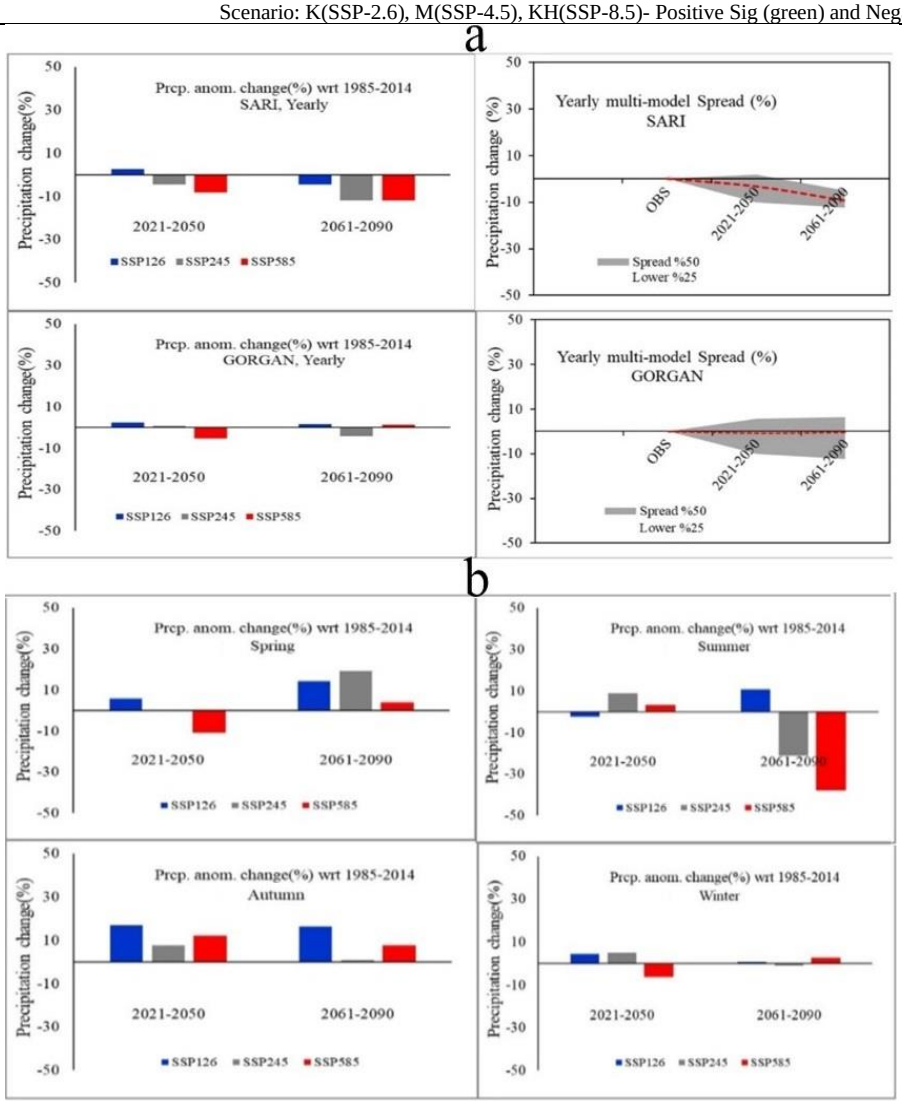
جدول ۷- تغییرات بارش در مقیاس سالانه و فصلی در ناحیه پست شمالی

Table 7- Annual and seasonal precipitation changes in the northern lowland zone

دوره Period	سناریو	ساری (Sari)					گرگان (Gorgan)					ناحیه پست شمالی				
		سال	فصل Season				سال	فصل Season				سال	فصل Season			
			ب	ت	پ	ز		ب	ت	پ	ز		ب	ت	پ	ز
۲۰۵۰- ۲۰۲۱	ک	+	+	−	+	+	+	+	−	+	+	+	+	−	+	+
	م	−	+	−	−	+	+	−	+	+	−	−	−	−	−	+
	خ	−	+	−	−	−	−	−	−	+	−	−	−	−	−	−
۲۰۹۰- ۲۰۶۱	ک	−	+	−	+	+	+	+	+	+	−	−	+	−	+	−
	م	−	+	−	−	−	−	+	−	−	−	−	+	−	−	−
	خ	−	−	−	−	+	−	−	−	+	−	−	−	−	−	−

سناریو انتشار: کم(توسعه پایدار)، متوسط(توسعه میانه)، خیلی زیاد(توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی)- معنی داری مثبت(سبز)، معنی داری منفی(زرد)

Scenario: K(SSP-2.6), M(SSP-4.5), KH(SSP-8.5)- Positive Sig (green) and Negative Sig(yellow)



شکل۷- (a)پیش‌نگری بارش ایستگاه منتخب (٪) (چپ) و محدوده عدم قطعیت (٪)(راست)، (b) پیش‌نگری فصلی ناحیه پست شمالی

Fig. 7. (a) Precipitation forecast at the selected station (%) (left) and uncertainty range (%) (right), (b) Seasonal forecast for the northern lowland zone

ناحیه پست جنوبی (ارتفاع ۱۲ متر):

بارش‌های سالانه در ناحیه پست جنوبی افزایش معنی‌داری را در سناریوهای مختلف در دوره آینده نزدیک و دور نشان می‌دهد (جدول۸ و شکل۸). بیشترین افزایش معنادار بارش در بین شش ناحیه مورد بررسی در این ناحیه رخ می‌دهد. چنانکه در هر سه ایستگاه ساحلی جنوب ایران، آبادان، اهواز و چابهار، افزایش معنی‌داری در بارش‌های سالانه مشهود است. در بین این سه ایستگاه، افزایش بارش در ایستگاه چابهار بیشتر است که افزایش بین ۱۰ تا بیش از ۵۰ درصد برآورد شده است. بارش‌های فصل بهار به طور کلی به جز در سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی آینده نزدیک و سناریوی میانه دوره آینده دور، کاهشی است، و در سناریوی توسعه پایدار دوره آینده نزدیک، کاهش معنی‌دار می‌باشد. چنانکه این کاهش در ایستگاه آبادان در همه سناریوها معنی‌دار می باشد، اما در ایستگاه اهواز، به جز در سناریوی توسعه پایدار در دیگر سناریوها افزایش غیر معنی‌داری را نشان می‌دهد. در چابهار بارش‌های بهار در تمامی سناریوها افزایشی، غیر معنی‌دار است. بارش‌های فصل تابستان به طور کلی در این ناحیه، به جز در سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی دوره آینده دور، افزایشی است که افزایش در سناریوهای توسعه پایدار و میانه در دوره دور معنادار است. به طور کلی بارش‌های فصل تابستان در این ناحیه افزایشی است. چنانکه در ایستگاه آبادان بارش‌های تابستانه در تمامی سناریوها افزایش معنی‌داری دارد، اما در اهواز بارش‌ها در دوره آینده نزدیک کاهشی و در دوره دور افزایشی غیر معنی‌دار می‌باشد. بارش‌های چابهار نیز، در تابستان به جز در سناریوی توسعه پایدار دوره نزدیک، افزایش غیر معنی‌داری دارد. بارش‌های فصل پاییز به طور کلی در این ناحیه افزایش معنی‌داری را نشان می‌دهد. چنانکه در در ایستگاه‌های آبادان، اهواز و چابهار در این فصل بارش‌ها در تمام سناریوها به جز در سناریوی توسعه پایدار در اهواز، افزایشی است. این افزایش در ایستگاه آبادان و اهواز عمدتاً معنی‌دار است. بارش‌های زمستان به طورکلی در این ناحیه ارتفاعی، کاهشی است که در سناریوی میانه دوره دور، معنی‌دار نیز می‌باشد. بیشترین کاهش معنی‌دار بارش‌های زمستان در آبادان بوده که در تمامی سناریوها کاهشی و معنی‌دار می‌باشد. اما در اهواز، به جز در سناریوی توسعه میانه دوره نزدیک و توسعه پایدار دوره دور، کاهش بارش‌های آینده مشهود است، برعکس در چابهار بارش‌های زمستان افزایش را نشان می‌دهد و در سناریوی توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی دوره نزدیک معنی‌دار می‌باشد.

مقادیر کمی تغییرات ناحیه‌ای بارش

تغییرات بارش نواحی ارتفاعی مختلف کشور (جدول ۹) همراه با معناداری تغییر آنها در سطح ۰/۰۵ تعیین شد. مناطق با تغییرات معنادار است در کنار درصد تغییر بارش مشخص شده است. همانطور که در جدول مشهود است، از شش ناحیه ارتفاعی مورد بررسی تنها در دو ناحیه پست شمالی (سواحل دریای خزر) و پست جنوبی (سواحل خلیج فارس و دریای عمان) تغییرات بارش معنادار است و تغییر در چهار ناحیه ارتفاعی دیگر (مرتفع، کوهپایه داخلی، کوهپایه بیرونی و مرکزی) معنادار نیستند. اگر چه در ناحیه مرتفع در اغلب سناریوها، روند کاهشی در بارش مشاهده می‌شود، اما سطح کاهش بارش به اندازه‌ای نیست که معنادار باشد. در نواحی ارتفاعی مرکزی و کوهپایه بیرونی کشور در تمامی سناریوها، بارش افزایش یافته است، اما سطح افزایش به اندازه‌ای نیست که معنادار تشخیص داده شود. علاوه بر این، بایستی به این موضوع توجه کرد که در طبیعت نیاز به آب تابعی از عرضه و تقاضای آب است، به نحوی که با افزایش دمای هوا طبق رابطه کلاسیوس-کلاپیرون به طور میانگین ۷ درصد نیاز آبی در طبیعت افزایش می‌یابد که به همین میزان عرضه آب را بلااثر می‌کند، لذا در صورت اعمال اثر افزایش دما ممکن است در تعداد زیادی از نواحی نیاز واقعی آب بیشتر باشد و حتی افزایش بارش نیز نیاز ناشی از گرمایش جهانی را جبران نکند. یافته‌های این تحقیق با نتایج تعداد به نسبت زیادی از پژوهش‌های خارجی و داخلی از جمله لی و همکاران (Lee et al., 2023) و بلبائیان و همکاران (Babaian, Karimian, Modirian & Mirzaei, 2019)، هماهنگی دارد.

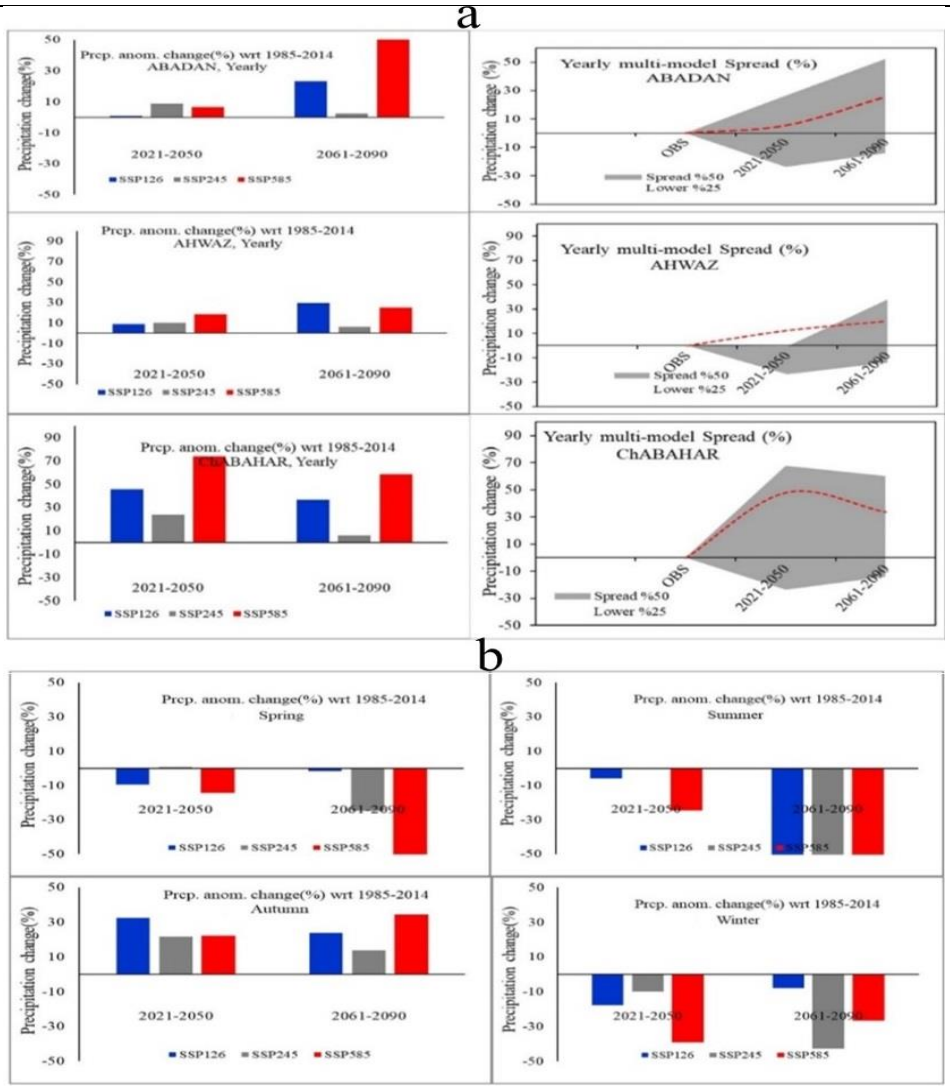
جدول ۸- تغییرات بارش در مقیاس سالانه و فصلی در ناحیه پست جنوبی

Table 8- Annual and seasonal precipitation changes in the southern lowland zone

دورPeriod	سناریو	آبادان(Abadan)					اهواز(Ahvaz)					چابهار(CHabahar)					ناحیه				
		سال	فصل Season				سال	فصل Season				سال	فصل Season				سال	فصل Season			
			ب	ت	پ	ز		ب	ت	پ	ز		ب	ت	پ	ز		ب	ت	پ	ز
۲۰۲۱-۲۰۵۰	ک	+	−	+	+	−	+	−	+	−	−	+	+	−	+	+	+	−	+	+	−
	م	+	−	+	+	−	+	−	+	+	+	+	+	−	+	+	+	−	+	+	−
	خ	+	−	+	+	−	+	−	+	+	−	+	+	−	+	+	+	+	+	+	−
۲۰۶۱-۲۰۹۰	ک	+	−	+	+	−	+	−	+	+	+	+	+	−	+	+	+	−	+	+	+
	م	+	−	+	+	−	+	−	+	+	−	+	+	−	+	+	+	+	+	+	−
	خ	+	−	+	−	+	+	−	+	−	−	+	+	−	+	−	+	−	+	+	−

سناریو انتشار: کم(توسعه پایدار)، متوسط(توسعه میانه)، خیلی زیاد(توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی)- معنی داری مثبت(سبز)، معنی داری منفی(زرد)

Scenario: K(SSP-2.6), M(SSP-4.5), KH(SSP-8.5)- Positive Sig (green) and Negative Sig(yellow)



شکل۸- (a)پیش‌نگری بارش ایستگاه منتخب (٪) (چپ) و محدوده عدم قطعیت (٪)(راست)، (b) پیش‌نگری فصلی ناحیه پست جنوبی

Fig. 8. (a) Precipitation forecast at the selected station (%) (left) and uncertainty range (%) (right), (b) Seasonal forecast for the southern lowland zone

جدول ۹- تغییرات بارش ناحیه‌ای کشور (بر حسب درصد) و معناداری آنها در سطح ۰/۰۵

Table 9- Regional precipitation changes across the country (percentage) and their significance at the 0.05 level

پست ساحلی Coastal Lowland		مرکزی Central	کوهپایه Foothills		مرتفع High	سناریو Cenario	دوره Period
جنوبی S	شمالی N		بیرونی Out	داخلی In			
18.6	2.6	23.3	33.2	35.7	3.7	SSP1-2.6	2021-2050
14.2	-1.7	21	39.2	4.2	1.5	SSP2-4.5	
32.9	-6.5	21.1	20.1	2.4	-3.2	SSP5-8.5	
29.7	-1.4	18.9	32	13.7	-4.8	SSP1-2.6	2061-2090
4.9	**-7.7**	17.9	27.5	-0.5	-4.2	SSP2-4.5	
44.9	-5.2	17.1	22.1	3.7	-4.6	SSP5-8.5	

نتیجه‌گیری

این پژوهش به شناخت الگوی رفتاری بارش‌های آینده ایران در پهنه‌های ارتفاعی مختلف تحت سناریوهای مختلف اقتصادی – اجتماعی (SSP) با استفاده از داده‌های مشاهداتی۱۴ ایستگاه همدیدی کشور، به عنوان نماینده ایستگاه‌های واقع در نواحی ارتفاعی مختلف، و برونداد تصحیح شده مدل‌های مجموعه فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده (CMIP6)می‌پردازد. نتایج پیش‌نگری‌ها و تحلیل‌ها نشان‌دهنده روند ناهمگن تغییرات بارش در پهنه‌های ارتفاعی کشور است که حاکی از اهمیت تأثیر ارتفاع و ناحیه جغرافیایی در چگونگی بارش‌های آینده کشور دارد. در مقیاس سالانه از شش ناحیه ارتفاعی مورد بررسی، تنها دو ناحیه پست شمالی (سواحل دریای خزر) و پست جنوبی (سواحل خلیج فارس و دریای عمان) شاهد تغییرات معنادار بارش هستند، به طوری که در این دو ناحیه تغییرات بارش به ترتیب به صورت کاهش و افزایش معنادار در دوره‌های آینده پیش‌نگری شده است. اما در چهار ناحیه ارتفاعی مرتفع، کوهپایه داخلی، کوهپایه بیرونی و مرکزی، گرچه هر دو روندهای کاهش و افزایش بارش مشاهده می‌شود، اما این تغییرات از نظر آماری معنادار نیستند. به‌ویژه آنچه نمود غالبی در پیش نگری‌های دارد، کاهش بارش در ناحیه مرتفع کوهستانی است، هر چند معنادار شناخته نشد. این ناحیه که منبع تامین آب رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی است، اهمیت زیادی در محیط زیست و حیات ایران دارد. همچنین افزایش بارش در نواحی مرکزی و کوهپایه بیرونی نیز مثبت ولی غیر معنادار است. از طرف دیگر در مقیاس فصلی، عمدهٔ افزایش در بهار طبق سناریوی انتشار کم، در هر دو دوره آینده نزدیک و دور مورد انتظار است. در نواحی پست شمالی در فصل تابستان کاهش معنی‌دار بارش‌ها برآورد شد، در حالی که در ناحیه پست جنوبی افزایش بارش تابستانی و پاییز مورد انتظار است. در ناحیه مرکزی افزایش بارش تابستان و پاییز طبق سناریوی انتشار کم پیش‌نگری شد. در نواحی کوهپایه بیرونی افزایش بارش در فصل بهار و تابستان برای برخی سناریوها برآورد گردید. همچنین در ناحیه کوهپایه بیرونی برای آینده نزدیک و سناریوی انتشار کم، افزایش بارش پیش‌نگری شد. در نواحی مرتفع تنها برای پاییز و آینده نزدیک طبق سناریوی انتشار کم، افزایش بارش برآورد گردید، اما در سایر فصول نواحی مختلف ارتفاعی بارش‌ها عمدتاً کاهشی خواهد بود. در ارزیابی کلی باید توجه داشت که نیاز واقعی به آب متأثر از عوامل دیگری مانند دما و تقاضای آبی نیز می باشد، و هر یک درجه افزایش دمای هوا حدود ۷ درصد نیاز آبی را در طبیعت افزایش می‌دهد که می‌تواند افزایش بارش‌ها را کم اثر سازد. یافته‌های این مطالعه با نتایج معتبر داخلی و بین‌المللی از جمله گزارش ششم ارزیابی هیات بین دولتی تغییر اقلیم همخوانی دارد و اهمیت بالای مدیریت منابع آب و سازگاری برای مخاطرات ناشی از تغییرات بارش را در کشور یادآوری می‌کند. در نهایت، این مطالعه نشان می‌دهد که تغییرات بارش در پهنه‌های ارتفاعی مختلف ایران ناهمگون بوده و تمرکز ویژه بر مناطق با کاهش معنادار در نواحی پست شمالی، افزایش معنادار در نواحی پست جنوبی و اغلب کاهشی در نواحی مهم و حیاتی مرتفع، برای آمایش اقلیمی و مدیریت منابع آب ضروری است.

References

Ahmadi, M., Lashkari, H., Azadi, M., & Kaykhosravi, Q. (2015). Detection of climate change with extreme precipitation indices in great Khorasan. Researches in Earth Sciences, 6(3), 34-52. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20088299.1394.6.3.3.1

Alijani, B. (2002). *Iran's Climate*. Payam Noor Publications, Tehran. [In Persian]

Alizadeh Choubari, O., & Najafi, M. S. (2017). Trends in changes in air temperature and precipitation in different regions of Iran. *Physics of Earth and Space*, *43*(3), 569-584. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jesphys.2017.60300

Ansari Mahabadi, S., Dehban, H., Zareian, M. J., & Farrokhnia, A. (2022). Studying the trend of temperature and precipitation changes in Iranian watersheds over the next 20 years based on the output of CMIP6 models, *Iranian Water Research*, *16*(1), 11-24. [In Persian] https://doi.org/10.22034/iwrj.2022.11204

Arrhenius, S. (1896). On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature on the ground. *The Philosophical Magazine*,*41*, 237-276.

Azare, A. (2016). *Modeling the effects of climate change on groundwater depletion and land degradation (case study, Qazvin Plain)*. (PhD thesis), University of Tehran, Faculty of Natural Resources. [In Persian]

Babaian, I., Karimian, M., Modirian, R., & Mirzaei, E. (2019). Forecasting the country's climate parameters using the CMIP5 series general circulation models: period 2100-2020. *Newar*, *43*(104-105), 67-77. [In Persian] https://10.30467/nivar.2019.142745.1103

Babaian, I., Karimian, M., Modirian, R., Flamarzi, Y., & Kouhi, M. (2021). Forecasting precipitation and temperature in the east of the country using combined dynamic-statistical downscaling. *Climate Change Research*, *2*(5), 41-58. [In Persian] https://doi.org/10.30488/ccr.2020.252239.1026

Bazrafshan Moghadam, M. (2016). *Study of the effect of climate change on precipitation and different regions of the country*. (Master's thesis), Shahrood University, Faculty of Technology, Civil Engineering Department. [In Persian]

Eghbali, A., Babaian, I., Azadi, M., Habibi Nokhandan, M., & Zarrin, A. (2021). Optimal configuration of the Mitney REGCM4.5 model on climatic zones for predicting precipitation during the rainy season in Iran (November-May), case study: years 2014-2019. *Climatological Research*, *13*(49), 1-14. [In Persian]

Fallah Kalaki, M., Shokri Kouchak, V., & Ramezani Etidali, H. (2021). Simulation of the effects of climate change using CMIP5 and CMIP6 climate models on runoff using the SWAT hydrological model (case study: Tashk-Bakhtegan watershed). *Iranian Water Resources Research*, *17*(3), 345-359. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1400.17.3.20.5

Fattahi, A., & Moghimi, Sh. (2019). Trends in snow cover changes in northwest Iran under the influence of climate change. *Applied Research in Geographic Sciences*, *19*, 54, 65-79. [In Persian] https://civilica.com/doc/1230677/

Fisher, M. J., Rao, I. M., Ayarza, M. A., Lascano, C. E., Sanz, J. I., Thomas, R. J., & Vera, R. R. (1994). Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature*, *371*(6494), 236-238. https://doi.org/10.1038/371236a0

Gur, E., Palta, S., Ozel, H. B., Varol, T., Sevik, H., Cetin, M., & Kocan, N. (2024). Assessment of climate change impact on highland areas in Kastamonu, Turkey. *Anthropocene*, *46*, 100432. https://doi.org/10.1016/j.ancene.2024.100432

Hajiabadi, F., Hassanpour, F., Yaghoubzadeh, M., & Hamami, H. (2019). Drought forecasting using data from the Fifth Climate Change Assessment Report in Birjand region. *Agricultural Meteorology*, *8*(1), 51-61. [In Persian] https://civilica.com/doc/1126425/

Halibian, A. H. (2008). *Studying the effect of the Azores high pressure on the temperature and precipitation of Iran*. (PhD thesis), University of Isfahan, Department of Geography. [In Persian]

Huang, M., Lin, R., Huang, S., & Xing, T. (2017). A novel approach for precipitation forecast via improved K-nearest neighbor algorithm. *Advanced Engineering Informatics*,*33*, 89-95. https://doi.org/10.1016/j.aei.2017.05.003

Hussien, W. E. A., Memon, F. A., & Savic, D. A. (2016). Assessing and modelling the influence of household characteristics on per capita water consumption. *Water Resources Management*, *30*(9), 2931-2955. https://doi.org/10.1007/s11269-016-1314-x

Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., ... & Zommers, Z. (2023). *Climate change 2023: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. https://10.59327/ipcc/ar6-9789291691647

Khazaei, M. R., Khazaei, H., & Thaqfian, B. (2019). The effect of climate change on extreme precipitation in dry regions of Iran. *Quarterly Journal of Environmental Science and Technology*, 22(9), 31-42. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jest.2021.40667.4508

Mohammadi, N., Sari-Saraf, B., & Rostamzadeh, H. (2012). Precipitation forecasting using CMIP6 models until the end of the 21st century in northwestern Iran. *Geography and Environmental Hazards*, *13*(1), 173-194. [In Persian] https://10.22067/geoeh.2022.76646.1223

Mortazavifar, S. M., Mobin, M. H., Mokhtari, M. H., Ekrami, M. & Rafiei Sardavii, E. (2018). Assessment of the effects of climate change on precipitation and temperature variables based on radiative forcing scenarios, case study: East of Mazandaran province. *Meteorology and Atmospheric Sciences*, *1*(4), 351-364. [In Persian] https://www.ims-jmas.net/article_113845.html

Pepin, N., Apple, M., Knowles, J., Terzago, S., Arnone, E., Hänchen, L., ... & Zardi, D. (2025). Elevation-dependent climate change in mountain environments. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1-17. https://doi.org/10.1038/s43017-025-00740-4

Tyndall, J. (1861). On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapours, and on the Physical Connexion of Radiation, Absorption, and Conduction. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, *22*, 169-194. https://doi.org/10.1098/rstl.1861.0001

Vol. 15, No. 1, Spring 2026, p. 193-225 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.95104.1606 OPEN ACCESS

Assessment of the Effects of Urban Green Patches Distribution and Surface Biophysical Characteristics on the Spatial Patterns of Urban Heat Islands Using Remote Sensing and GIS Techniques (Case Study: Mosul City in 2024)

Ebrahim Sami [1]*, Mohammad Saleh Sish [1], Keyvan Mohammadzadeh Alajujeh [2]

[1] Department of Geography and Urban Planning, Faculty of Humanities, Maragheh University, Maragheh, Iran
[2] Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 26 August 2025

Revised: 23 December 2025

Accepted: 27 December 2025

Available Online:

24 January 2026

Keywords:

Urban Heat Islands (UHIs)

Land Surface Temperature (LST)

NDVI

Urban Climate

Impervious Surfaces

Mousel, Iraq

ABSTRACT

Urban heat islands (UHIs) are an environmental challenge in developing cities such as Mosul, intensified by the reduction of vegetation cover and the increase of impervious surfaces. This study, has employed Landsat 9, MODIS, and Sentinel-2A imagery along with object-based processing, examined the role of land use changes and surface characteristics in the formation of Mosul's SUHI in 2024. The findings indicated that vegetation cover has the greatest cooling effect, showing a strong negative correlation with surface temperature (r = -0.833), while built-up areas, represented by NDBI and SI indices, exhibit a positive correlation with temperature. Areas with vegetation were up to 5.6°C cooler than densely urbanized areas. The greatest contribution to the intensification of heat islands comes from built-up areas, whereas green spaces and agricultural lands play a significant role in temperature reduction. Cooling effects of green patches are stronger during the day than at night. In summer, SUHI intensity increased, with the highest temperatures reaching up to 43°C in peripheral areas, while the city center retained more heat at night. The GSCEI index confirmed a reduction of up to 2.5°C in the vicinity of green patches. The uneven distribution of green spaces and surface characteristics plays a fundamental role in the intensity and extent of SUHI.

* Corresponding author: Ebrahim Sami E-mail address: Sami@maragheh.ac.ir

How to cite this article: Sami, E., Sish, M. S., & Mohammadzadeh Alajujeh, K. (2026). Assessment of the Effects of Urban Green Patches Distribution and Surface Biophysical Characteristics on the Spatial Patterns of Urban Heat Islands Using Remote Sensing and GIS Techniques (Case Study: Mosul City in 2024). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 15*(1), 193-225. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.95104.1606

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Urban expansion and the reduction of green spaces are among the principal drivers of surface urban heat islands (SUHIs) a phenomenon that has become a major challenge in contemporary cities, particularly in arid and semi-arid regions. The intensification of SUHIs not only affects local climate conditions but also influences energy consumption, public health, and overall urban sustainability. Increasing urban temperatures can exacerbate heat stress, elevate air conditioning demands, and contribute to poor air quality. This study aims to examine the influence of green patches and surface biophysical characteristics on UHI patterns in the city of Mosul. By integrating multiple remote sensing datasets with GIS-based spatial analyses, the research provides a comprehensive and detailed assessment of the spatio-temporal patterns of land surface temperature (LST) and its relationships with various biophysical indices. Furthermore, this study seeks to identify critical areas where targeted interventions, such as the expansion of green spaces or modification of surface materials, can effectively mitigate SUHI effects.

Material and Methods

To assess the effects of the spatial distribution of urban green patches and surface biophysical properties on SUHI patterns, we first used meteorological data from the Mosul synoptic station to identify the city's minimum and maximum temperature periods. This approach allowed us to focus on the most thermally sensitive periods and provided a reliable baseline for LST comparisons. We then acquired time-matched satellite imagery Sentinel-2A, Landsat-9, and MODIS from 2024 covering both daytime and nighttime windows in summer and winter. After rigorous preprocessing, including atmospheric correction, radiometric calibration, and geometric alignment, the images were classified to differentiate between impervious surfaces, vegetation, water bodies, and other land cover types. SUHIs across Mosul were subsequently identified using standard LST extraction methods and validated with ground-based observations where available. LST outputs were overlaid with green-patch layers and additional biophysical variables, including vegetation cover, surface type, soil moisture, buildings, and surface water. Their correlations with LST were computed to elucidate the spatial distribution and intensity of heat islands in various urban contexts. ArcGIS, eCognition Developer, ENVI 5.3 and Microsoft Excel were employed for image processing, classification and statistical analyses, ensuring a rigorous and reproducible workflow.

Results and Discussion

Both the present study and prior international research emphasize the importance of appropriately distributing green spaces and managing impervious surfaces to mitigate thermal impacts and improve residents' quality of life. Our findings show that the NDVI averages 0.78 in areas with greater vegetation cover and decreases to 0.45 in impervious areas; this inverse relationship between NDVI and temperature is reflected in a strong negative correlation ($R = -0.833$), clearly indicating the cooling effect of vegetation on surface temperatures. In addition, analysis of LST in four-time windows (daytime and nighttime in summer, and daytime and nighttime in winter) demonstrates a significant influence of land use on the spatial distribution of surface heat in Mosul. In summer, industrial and commercial land uses especially industrial zones with daytime LST of 38.199 °C and nighttime LST of 43.007 °C contribute most to elevated surface temperatures, likely due to the high density of heat-absorbing construction materials, scarcity of vegetation, and heat-generating activities. Dense commercial and residential areas also play a substantial role in increasing LST because of compact urban form, extensive asphalt coverage, and heavy vehicular traffic. The temporal analysis further shows that daytime LST peaks are closely associated with solar radiation exposure, while nighttime temperatures remain elevated in densely built areas due to the thermal retention of construction materials, a phenomenon often referred to as the "urban heat storage effect." The spatial patterns of LST also reveal that peripheral districts with scattered vegetation exhibit

slightly lower temperatures, indicating that strategic placement of green patches can create meaningful thermal refuges even in predominantly urbanized settings.

Conclusion

The results indicate that the uneven distribution of green spaces and the expansion of impervious surfaces are key drivers of SUHI intensification in Mosul. Surface biophysical characteristics, particularly in areas with limited vegetation, exert a marked effect on increasing temperatures and amplifying SUHI formation. The study underscores the critical role of green-patch distribution and biophysical attributes in shaping LST and UHI patterns in Mosul. These findings can inform management strategies aimed at moderating UHI effects and improving urban environmental conditions. Future urban planning should prioritize developing a connected network of green spaces, especially in central districts; employing high-albedo construction materials; and implementing green roofs and green walls in high-density areas. Such measures can reduce urban ambient temperatures, enhance residents' thermal comfort, and improve overall quality of life. Furthermore, incorporating green infrastructure into urban design can simultaneously provide ecological benefits, such as improved stormwater management, air purification, and biodiversity conservation, thereby creating more resilient and sustainable cities. By combining these approaches with continuous monitoring using remote sensing and GIS, city planners can develop evidence-based strategies to mitigate SUHI impacts and support long-term urban sustainability goals.

جلد ۱۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۲۲۵-۱۹۳ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

دسترسی آزاد

DOI: 10.22067/GEOEH.2025.95104.1606 مقاله پژوهشی

بررسی تأثیر لکه‌های سبز و ویژگی‌های بیوفیزیکی سطح بر الگوی جزایر حرارتی شهری با استفاده از سنجش از دور و GIS (مطالعهٔ موردی: موصل در سال ۲۰۲۴)

ابراهیم سامی[۱*]، محمد صالح سیش[۱]، کیوان محمدزاده آلاجوجه[۲]

[۱] گروه جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

[۲] گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

کلمات کلیدی:

جزایر حرارتی شهری (UHIs)

دمای سطح زمین

NDVI

اقلیم شناسی شهری

سطوح نفوذ ناپذیر

موصل عراق

چکیده

جزایر حرارتی شهری، چالشی محیط‌زیستی در شهرهای در حال توسعه مانند موصل هستند. که در اثر کاهش پوشش گیاهی و افزایش سطوح نفوذناپذیر تشدید می‌شود. این پژوهش با استفاده از تصاویر لندست ۹، MODIS و سنتینل 2A و پردازش شی‌گرا، نقش تغییرات کاربری اراضی و ویژگی‌های سطح زمین در شکل‌گیری SUHI موصل در ۲۰۲۴ را بررسی کرده است. یافته‌ها نشان داد پوشش گیاهی بیشترین اثر خنک‌کنندگی را دارد و با دمای سطح رابطه منفی قوی (r = -0.833) دارد، در حالی که سطوح ساخته‌شده با شاخص‌های NDBI و SI رابطهٔ مثبت با دما دارند. مناطق دارای پوشش گیاهی تا ۵.۶ درجه خنک‌تر از مناطق شهری متراکم بودند. بیشترین تأثیر در تشدید جزایر حرارتی مربوط به مناطق ساخته شده است، در حالی که فضاهای سبز و کشاورزی نقش مهمی در کاهش دما دارند. خنک‌کنندگی لکه‌های سبز در روز بیشتر از شب است. در تابستان، شدت SUHI افزایش یافته و بیشترین دما تا ۴۳ درجه در نواحی حاشیه‌ای مشاهده شد، در حالی که مرکز شهر گرمای بیشتری در شب حفظ کرد. شاخص GSCEI کاهش دمای محیط تا ۲.۵ درجه در اطراف لکه‌های سبز را تأیید کرد. توزیع نامتوازن فضاهای سبز و ویژگی‌های سطح زمین نقش اساسی در شدت و گستره SUHI دارد.

مقدمه

توسعهٔ شهرها و کاهش فضاهای سبز یکی از عوامل مهم و مؤثر در شکل‌گیری جزایر گرمایی است (Liu, Wu, Yang, Zhang & Yin, 2024a; Guan & Hu, 2025)، پدیده‌ای که به یکی از مشکلات مهم در شهرها تبدیل شده است (Guha, Tiwari &

* نویسنده مسئول: ابراهیم سامی

Email: Sami@maragheh.ac.ir

(Zhang, 2024 ; Xiong, Chen, He, Luo & Li, 2023) جزیرهٔ گرمایی شهری (UHI) مفهومی است که به افزایش دما در مناطق شهری در مقایسه با مناطق روستایی یا حومه شهر اشاره دارد. این افزایش دما به دلیل فراوانی ساختمان‌ها، جاده‌ها، پارکینگ‌ها و سایر سازه‌های انسانی در شهرها، و همچنین کاهش فضاهای سبز و آب، و نیز افزایش فعالیت‌های انسانی مانند ترافیک و صنایع است (Darbani, Rafieian, Parapari & Guldmann, 2023)، که می‌تواند منجر به مشکلاتی مانند آلودگی هوا، افزایش مصرف انرژی برای خنک کردن و افزایش بیماری‌های حاد و مزمن مرتبط با گرما از جمله ناراحتی گرمایی و استرس گرمایی شود (Xiong et al., 2023). افزایش دما همچنین می‌تواند منجر به افزایش مصرف انرژی برای خنک کردن محیط‌های داخلی و خارجی و افزایش هزینه‌های انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای شده و سبب افزایش آلودگی هوا شود، زیرا هوا، گرم‌تر و پایدارتر می‌شود و ذرات آلاینده بیشتری را در جو به دام می‌اندازد (Barati, Farajzadeh Asl & Borna, 2022; Moradi & Rezaei Moghaddam, 2020). این وضعیت می‌تواند منجر به افزایش بیماری‌های حاد مانند آسم و بیماری‌های قلبی - عروقی و همچنین بیماری‌های مزمن تنفسی شود (Shorabeh, Kakroodi, Firozjaei, Minaei & Homaee, 2022). همچنین، افزایش دما و کاهش فضاهای سبز می‌تواند اثرات منفی بر زیستگاه‌های طبیعی شهری و پیرامون شهری داشته باشد و منجر به کاهش تنوع زیستی و کیفیت محیط شود (Kim, Khouakhi, Corstanje & Johnston, 2024). پدیدهٔ جزیرهٔ گرمایی شهری(UHI) در دهه‌های اخیر موضوع تحقیقات گسترده‌ای بوده است، با تمرکز ویژه بر جزیره گرمایی سطح شهری (SUHI) جایی که مناطق شهری در مقایسه با محیط‌های روستایی اطراف خود، دمای بالاتری را تجربه می‌کنند. با این حال، بررسی نسبتاً کمتری از پدیدهٔ جزیرهٔ خنک سطح شهری (SUCI)[1] انجام شده است (Guha et al., 2024; Mahmoudzadeh, Naghdbishi & Momeni, 2018). یکی از عوامل اصلی که به تشکیل جزیرهٔ گرمایی شهری کمک می‌کند، تغییرات کاربری اراضی و پوشش اراضی است، مانند تخریب لکه‌های سبز شهری، پوشش گیاهی، ساخت‌وساز جدید، سازه‌های بتنی، جاده‌ها و کوچه‌های آسفالتی و فعالیت‌های صنعتی و خانگی که گسترش و توسعهٔ جزیرهٔ گرمایی شهری را تسریع می‌کند (Gandomkar & Salehi, 2022). امروزه، استفاده از تصاویر و داده‌های ماهواره‌ای برای مطالعه و ارزیابی تغییرات در دمای سطح و جزایر گرمایی در مقایسه با روش‌های سنتی، هزینه‌های تحقیق را به میزان قابل توجهی کاهش داده است. در حال حاضر، افزایش دمای سطح و ظهور جزایر گرمایی شهری به دلیل اثرات مخربی که دارد، یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی در شهرها است (Das, Mondal, Sutradhar & Ghosh, 2021). بنابراین، پایش فضایی- زمانی و کنترل شدت جزایر گرمایی برای تجزیه و تحلیل محیط حرارتی در مقیاس شهر ضروری و بسیار مهم است. چرا که شناسایی چنین ناهنجاری‌هایی در محیط حرارتی شهری، اطلاعات مفیدی را جهت تجهیز مناطق شهری برای انعطاف‌پذیری و پایداری بیشتر فراهم می‌کند (Mohammadi & Afifi, 2021). در این راستا، تصاویر سنجش از دور به دلیل قابلیت‌های خاص خود به طور گسترده توسط محققان برای تخمین دمای سطح استفاده شده‌اند و صحت آنها در تخمین دمای سطح تأیید شده است (Athick, Shankar & Naqvi, 2019 Das et al., 2021).

علی‌رغم افزایش شهرنشینی و تغییرات مرتبط در لکه‌های سبز شهری،کاربری و پوشش اراضی، کمبود درک جامع از رابطه بین فضای سبز، خواص بیوفیزیکی سطح و اثر جزیره گرمایی سطح شهری (SUHI) در شهر موصل وجود دارد. این شکاف دانش مانع از استراتژی‌های مؤثر کاهش و سازگاری با تغییرات آب و هوایی محلی می‌شود. بنابراین، نیاز به بررسی تعامل بین فضای سبز، خواص بیوفیزیکی سطح و SUHI برای درک بهتر الگوهای فضایی جزایر حرارتی شهری موصل وجود دارد. این مطالعه با هدف ارزیابی تغییرات شبانه‌روزی در دمای سطح زمین (LST) و جزیرهٔ گرمایی سطح شهری (SUHI) در شهر موصل و همبستگی آنها با شاخص‌های NDVI، NDBI و MNDWI و سایر ویژگی‌های بیوفیزیکی انجام گرفت.

1- Surface Urban Cool Island

ادبیات پژوهش

مناطق شهری و برون‌شهری مدت زیادی است که شاهد پدیدهٔ جزیره حرارتی بوده‌اند (Liu et al., 2024b). جزیرهٔ حرارتی به دلیل از بین رفتن پوشش‌های طبیعی و ایجاد سطوح فیزیکی مصنوعی مانند ساختمان‌ها و آسفالت شکل می‌گیرد. این سطوح انرژی خورشیدی را در طول روز جذب کرده و در شب انرژی گرمایی را به دام می‌اندازند، که باعث می‌شود دما در مراکز شهری، به‌ویژه در شب‌های آرام و صاف، ۶ تا ۸ درجه سلسیوس بالاتر از مناطق حومه باشد (Liu et al., 2024b؛ Wesley & Brunsell, 2019). جزایر حرارتی شهری به دلیل وجود عوامل مختلفی در مناطق شهری شکل می‌گیرند که این عوامل را می‌توان به دو دستهٔ عمده تقسیم کرد. عوامل بیوفیزیکی شامل نوع و درصد پوشش‌های گیاهی و آب‌های موجود در سطح شهر هستند. مطالعات نشان داده‌اند که الگوهای فضای سبز شهری می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر شدت جزایر حرارتی داشته باشند (Liu et al., 2024a). از سوی دیگر، عوامل انسانی شامل ویژگی‌های ساختاری و معماری ساختمان‌ها، نوع مصالح مورد استفاده، و الگوهای ترافیک و فعالیت‌های انسانی هستند. تأثیرات زیرساخت‌های شهری و تعاملات بین فضاهای سبز و مناطق ساخته شده نیز به‌عنوان عواملی مؤثر در ایجاد جزایر حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است (Wesley & Brunsell, 2019؛ Guan & Hu, 2025). برای کاهش اثرات منفی جزایر حرارتی، می‌توان از راهکارهای متنوعی استفاده کرد. استفاده از فضاهای سبز، مانند پارک‌ها و باغ‌ها، می‌تواند به کاهش دما و بهبود کیفیت هوا کمک کند (Demisse Negesse, Hishe & Getahun, 2024). طراحی بام‌های سبز و دیوارهای سبز نیز به عنوان استراتژی‌های مؤثر در کاهش دما و بهبود شرایط زیست‌محیطی شناخته می‌شوند (Wu, Zhou & Ren, 2024). همچنین، استفاده از مصالح سرد با انعکاس بالای تابش خورشیدی می‌تواند به کاهش دما در سطح ساختمان‌ها و خیابان‌ها کمک کند (Xiao, Dong, Yan, Yang & Xiong, 2018). با توجه به افزایش جمعیت شهری و پدیده جزیره حرارتی، اجرای این راهکارها می‌تواند به بهبود کیفیت زندگی شهروندان و کاهش مشکلات زیست‌محیطی کمک کند (Xu et al., 2022).

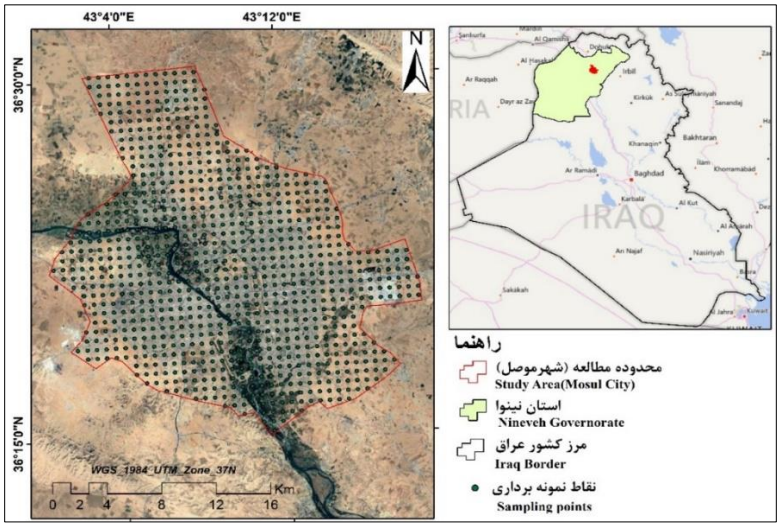
فضاهای سبز شهری (UGS)[1] پتانسیل کاهش دمای مناطق اطراف را از طریق تبخیر، فراهم کردن سایه و افزایش آلبیدو دارند (Bowler, Buyung-Ali, Knight & Pullin, 2010). بنابراین، UGS به عنوان یک استراتژی کاهش UHI برای انواع مختلف UGS (مانند پارک‌ها، چمن، بام‌ها و دیوارهای سبز) با روش‌های مختلف (مانند اندازه‌گیری‌های میدانی، سنجش از دور و شبیه‌سازی‌های مدل) به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. با این حال، شدت اثرات خنک‌کنندگی UGS به طرز قابل توجهی با نوع UGS، زمینهٔ شهری و اقلیمی متفاوت است. بیشتر مطالعات اثرات خنک‌کنندگی محلی UGS همچنین بر محدودهٔ محدودی از مکان‌ها، نوع خاصی از UGS و یا دامنه‌ای از روش‌هایی که به راحتی قابل مقایسه نیستند، متمرکز شده‌اند (Bartesaghi Koc & Tschanz, 2018)، که شناسایی اثرات خنک‌کنندگی UGS را که در مناطق شهری جهانی مختلف قابل اعمال است، محدود می‌کند. با افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی، نیاز به اطلاعات دقیق و به‌روز در مورد وضعیت محیط‌های شهری ضروری است. تحلیل جزایر حرارتی، که ناشی از افزایش سطوح سخت و کاهش سطوح گیاهی است، نیز با استفاده از داده‌های حرارتی امکان‌پذیر است و می‌تواند تأثیرات این پدیده بر کیفیت زندگی ساکنان را بررسی کند (Darbani et al., 2023). علاوه بر این، سنجش از دور به عنوان ابزاری برای بررسی الگوهای رشد شهری و پیش‌بینی توسعه‌های آینده مورد استفاده قرار می‌گیرد (Leonardo et al., 2025). در نهایت، این تکنیک به پایش کیفیت هوا، آلودگی و تغییرات اقلیمی نیز کمک می‌کند و اطلاعات حیاتی برای مدیریت بحران‌های محیطی را فراهم می‌آورد (Shorabeh et al., 2022). مطالعات زیادی در این مورد انجام شده است که مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد که پژوهش‌های متعددی به بررسی رابطهٔ پوشش گیاهی، توسعهٔ شهری و تغییرات دمای سطح زمین پرداخته‌اند.

1- Urban Green Spaces

امین‌زاده و قشلاق‌پور (Aminzadeh & Gheshlaghipour, 2020) در تهران با استفاده از شاخص NDVI و LST نشان دادند که افزایش فضاهای سبز موجب کاهش دمای سطحی و بهبود شرایط زیست‌محیطی می‌شود، درحالی‌که گسترش سطوح ساخته‌شده دما را افزایش می‌دهد. پژوهش ثروتی و همکاران (Servati, Latifi, Soltani & Sanaeiyan, 2021) نیز با بهره‌گیری از داده‌های سنجنده MODIS و تحلیل GIS در تهران، بر نقش جزایر حرارتی شهری و تأثیر تمرکز تراکم ساختمانی بر افزایش دما تأکید دارد. انصاری و نوروزی (Ansari & Norouzi, 2022)، در اهواز با استفاده از NDVI و LST نشان دادند که همبستگی معناداری بین تراکم پوشش گیاهی و دمای سطح زمین وجود دارد و هر چه پوشش گیاهی کاهش یابد، شدت گرمای سطحی افزایش می‌یابد. مطالعهٔ تیموری و همکاران (Teimouri, Moharrampour & Asghari Zamani, 2023) نیز در تبریز نیز بدون اشاره به شاخص خاص، نشان داد که توسعهٔ ساخت‌وساز و افزایش تراکم شهری به افزایش دمای سطحی منجر می‌شود. آدداس (Addas, 2023)، در جدهٔ عربستان با ترکیب LST و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) دریافت که زیرساخت‌های شهری تأثیر قابل توجهی بر الگوهای گرمایی دارند و افزایش سطوح ساخته‌شده به گسترش مناطق داغ منجر شده است. همچنین لو و همکاران (Lu et al., 2024) در پکن با استفاده از LST و GITS تأکید کردند که زیرساخت‌های آبی و نفوذپذیر می‌توانند نقش مؤثری در کاهش گرمای شهری داشته باشند. درنهایت لئوناردو و همکاران (Leonardo et al., 2025) در ایالت رسیف برزیل با استفاده از NDVI و LST نشان دادند که افزایش پوشش گیاهی و کاهش کاربری‌های ساختمانی، نقش مهمی در تعدیل دمای سطح و بهبود شرایط حرارتی منطقه دارد. با توجه به این موارد پژوهش حاضر به ارزیابی اثرات توزیع لکه‌های سبز شهری و ویژگی‌های بیوفیزیکی سطح بر الگوهای فضایی جزایر حرارتی شهری با استفاده تکنیکهای سنجش از دور و GIS (مطالعهٔ موردی: شهر موصل) پرداخته است.

منطقهٔ مورد مطالعه

شهر موصل در شمال عراق دارای اقلیم نیمه‌خشک با تابستان‌های بسیار گرم و خشک و زمستان‌هایی نسبتاً سرد و مرطوب است. میانگین دمای سالانه بین ۳ تا ۴۳ درجه سلسیوس متغیر است و در تابستان دما گاهی به بیش از ۴۵ درجه می‌رسد. فصل گرم از اوایل ژوئن تا پایان سپتامبر و فصل سرد از نوامبر تا مارس ادامه دارد. ژوئیه گرم‌ترین و ژانویه سردترین ماه‌ها هستند. میانگین بارش موصل سالانه حدود ۳۶۴ میلی‌متر می‌باشد که بیشتر در زمستان و بهار رخ می‌دهد. ماه‌های دسامبر تا مارس بیشترین بارش را تجربه می‌کنند و تابستان تقریباً بدون بارش است. درصد پوشش ابر در ماه‌های سرد بیشتر است و رطوبت در تابستان به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (WeatherSpark, 2024). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی شهر موصل را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شهر موصل

Fig. 1. Geographical location of Mosul City

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر که با هدف ارزیابی اثرات توزیع لکه‌های سبز شهری و ویژگی‌های بیوفیزیکی سطح بر الگوهای فضایی جزایر حرارتی شهری انجام شده است در گام نخست با بهره‌گیری از داده‌های هواشناسی ایستگاه همدید شهر موصل، به‌ترتیب دماهای کمینه و بیشینه (۱۴ ژوئیه ۲۰۲۴ برابر با ۲۴ تیر ۱۴۰۳به عنوان گرمترین روز سال در شهر موصل و ۲۸ ژانویه ۲۰۲۴ برابر با ۸ بهمن ۱۴۰۲ به عنوان سردترین روز سال در شهر موصل) انتخاب شد و تصاویر ماهواره‌ای از جمله تصاویر سنتینل A2، لندست ۹ و سنجنده MODIS مربوط به آن زمان‌ها در دو نوبت زمانی روزانه و شبانه تهیه گردید و سپس اقدام به پردازش و شناسایی جزایر حرارتی در شهر موصل گردید. در نهایت با اعمال همپوشانی نتایج حاصل از محاسبات دمای سطح با لکه‌های سبز شهری (شامل پارک‌ها، باغ‌ها، فضاهای سبز عمومی و حتی بام‌های سبز) و ویژگی‌های بیوفیزیکی سطح شهر از جمله لایه‌های پوشش گیاهی، نوع سطح، رطوبت خاک، ساختمان‌ها و آب‌های سطحی و محاسبهٔ میزان همبستگی بین آنها، اقدام به تشریح توزیع جزایر حرارتی در سطح شهر موصل شد. جهت انجام تحقیق جاری از نرم افزارهای ArcGIS، eCognition developer، ENVI5.3 و اکسل جهت محاسبات آماری استفاده شد. لازم به ذکر است که با توجه به اختلاف قابل‌توجه وضوح مکانی بین داده‌های لندست و مادیس (۳۰ متر در مقابل ۱۰۰۰ متر)، از ریسمپلینگ خودداری شد. به‌جای آن، با به‌کارگیری ابزار Fishnet درArcGIS ، شبکه‌ای همگن از نقاط نمونه ایجاد (شکل ۱)، و مقادیر دمای سطح زمین (LST) و سایر شاخص‌های طیفی در موقعیت‌های مکانی یکسان از هر دو منبع استخراج گردید. سپس تحلیل‌های آماری بر پایه این داده‌های یکپارچه در محیط اکسل انجام شد. این رویکرد، هم‌مکانی دقیق شاخص‌های چندمقیاسه را بدون تخریب اطلاعات مکانی ممکن ساخت. همچنین، روند کلی انجام تحقیق در شکل ۲ به‌صورت فلوچارت نمایش داده شده است.

محاسبهٔ دمای روزانه سطح زمین (تصاویر سطح دوم لندست ۹)

در تصاویر سطح دوم (Level-2) ماهواره‌های لندست، تصحیحات اتمسفری، گسیلندگی سطح و تبدیل‌های رادیومتریک به‌صورت خودکار در فرآیند تولید داده‌ها انجام شده است. بنابراین، باند مربوط به دمای سطح زمین مستقیماً بیانگر دمای واقعی سطح بوده و نیازی به مراحل میانی مانند محاسبه رادیانس، دمای درخشندگی یا تابندگی سطح ندارد. تنها کافی است مقدار عددی هر پیکسل با استفاده از ضرایب مقیاس و ثابت‌های کالیبراسیون که در متادیتای تصویر ارائه شده‌اند، به واحد دما تبدیل شود (USGS, 2021; Thammaboribal, Triapthti & Lipiloet, 2025). فرمول عمومی تبدیل مقدار پیکسل حرارتی (QTIR) به دمای سطح زمین بر حسب درجهٔ سلسیوس به صورت رابطه (۱) است:

$$LST=(0.00341802\times QTIR+149)-273.15 \quad (۱)$$

شکل ۲ مراحل محاسبهٔ دمای سطح زمین از داده‌های خام لندست را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است به دلیل استفاده از تصاویر سطح دوم (Level-2) ، مراحل میانی ذکر شده در شکل صرفاً برای درک روند محاسبات نظری ارائه شده‌اند.

محاسبهٔ دمای شبانه سطح زمین (تصاویر سنجنده مادیس)

دمای سطح زمین، شبانه از محصول آماده MODIS LST (MOD11A1, Version 6.1) استخراج شد. این محصول به صورت عملیاتی و با استفاده از الگوریتم دوکاناله (Split-Window) بر پایه باندهای حرارتی ۳۱ و ۳۲ تولید شده است (Guillevic et al., 2018). در این پژوهش، دمای سطح زمین به صورت مستقیم از این محصول استخراج شده و محاسبه الگوریتمی مجدد انجام نشده است. همچنین، مجموعه‌ای از شاخص‌های طیفی جهت نیل به هدف تحقیق بر روی تصاویر مختلف اعمال شد که اهم این شاخص‌های طیفی سنجش از دور در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات تصاویر استفاده شده در روند تحقیق

Table 1- Specifications of the satellite images used in the research process

ماهواره Satellite	قدت تفکیک مکانی Spatial resolution	تاریخ Date
لندست ۹ Landsat9	۳۰ متر 30 meter	۱۴ ژوئیه ۲۰۲۴ 14 July 2024
لندست ۹ Landsat9	۳۰ متر 30 meter	۲۸ ژانویه ۲۰۲۴ 28 January 2024
ترا-سنجنده MODIS	۱ کیلومتر 1 Kilometer	۱۴ ژوئیه ۲۰۲۴ 14 July 2024
ترا-سنجنده MODIS	۱ کیلومتر 1 Kilometer	۲۸ ژانویه ۲۰۲۴ 28 January 2024
سنتینلSentinel 2A- 2A	۱۰ متر 10 meter	۱۴ ژوئیه ۲۰۲۴ 14 July 2024
سنتینل2A Sentinel 2A-	۱۰ متر 10 meter	۲۸ ژانویه ۲۰۲۴ 28 January 2024

روش طبقه‌بندی شیءگرا -الگوریتم جنگل تصادفی

الگوریتم جنگل تصادفی بر اساس مجموعه‌ای از درخت‌های تصمیم کار می‌کند و با ترکیب پیش‌بینی‌های چندین درخت، دقت و پایداری مدل را افزایش می‌دهد. ایدهٔ اصلی جنگل تصادفی این است که به جای استفاده از یک درخت تصمیم واحد، مجموعه‌ای از درخت‌های تصمیم را به‌طور تصادفی ایجاد کرده و در نهایت نتیجهٔ آن‌ها را تجمیع کند (Belgiu & Drăguţ, 2016). طبقه‌بندی شی گرا با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی در نرم افزار eCognition Developer ، روشی قدرتمند برای تحلیل تصاویر ماهواره ای و داده های مکانی است. این الگوریتم با ایجاد درخت های تصمیم متعدد و ترکیب نتایج آنها، دقت طبقه‌بندی را بهبود می بخشد. یکی از مزایای اصلی این الگوریتم در پردازش تصاویر ماهواره‌ای این است که می‌تواند به‌خوبی با داده‌های چندطیفی و ابرطیفی سازگار شود و با ترکیب ویژگی‌های بافتی، طیفی و مکانی، دسته‌بندی با دقت بالایی ارائه دهد. علاوه بر این، قابلیت محاسبهٔ اهمیت ویژگی‌ها در این الگوریتم کمک می‌کند تا ویژگی‌های مؤثر در دسته‌بندی مشخص شوند، که این موضوع در تحلیل تغییرات کاربری اراضی بسیار ارزشمند است (Gislason, Benediktsson & Sveinsson, 2006).

شاخص جزیرهٔ گرمای سطحی شهر (SUHI)

جهت تحلیل کمی اثر جزیرهٔ حرارتی شهری در منطقهٔ مورد مطالعه، از شاخص شدت (SUHI) استفاده شده است. برای به‌کارگیری این روش، ابتدا لازم است که مناطق شهری و مرجع به درستی مشخص شوند (Zhang et al., 2024). با استناد به تحقیقات مرتبط در خصوص دمای مرجع، از دمای سطح زمین (LST) در مرکز شهر به‌عنوان نمایندهٔ دمای شهری و از دمای LST در فضاهای باز پیرامون و پارک‌ها به‌عنوان نماینده دمای مناطق حومه (مرجع) استفاده شده است. تفاوت میان این دو مقدار نشان‌دهندهٔ شدت SUHII است. اگر مقدار محاسبه شده بزرگ‌تر از صفر باشد، وجود پدیدهٔ جزیرهٔ حرارتی شهری را نشان می‌دهد (معمولاً نواحی مرکزی شهر با پوشش آسفالت و بتن)، اگر مساوی صفر باشد، منطقهٔ مورد نظر هیچ تفاوتی با دمای مرجع ندارد و ممکن است خودِ منطقه مرجع یا فضای سبز باشد و اگر کمتر از صفر باشد، به معنای وجود اثر خنک جزیره‌ای است (Lu, He, Xu & Qiao, 2021). استفاده از SUHI به جای UHI در این مطالعه به دلیل تمرکز بر دمای سطح زمین (LST) است. رابطه SUHII به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Zhang et al., 2024):

$$SUHI=LST_{\text{شهری}}-LST_{\text{مرجع}} \quad (۲)$$

LST شهری: میانگین دمای مناطق شهری.

LST مرجع: میانگین دمای مناطق غیرشهری (مانند پارکها، زمینهای کشاورزی یا مناطق کم تراکم).

جدول ۲- شاخص‌های سنجش از دور

Table 2- Remote sensing indices

منبع **Source**	معادله **Equation**	قدرت تفکیک مکانی **Spatial resolution**	ماهواره **Satellite**	شاخص **Index**
Almohamad & Alshwesh, 2023	(((Green + Red + SWIR2) / 3) - SWIR1) / (((Green + Red + SWIR2) / 3) + SWIR1)	10	سنتینل 2A Sentinel2A	BLFEI[1]
Kaimaris & Patias, 2016	$\frac{\rho\text{SWIR2} - \rho NIR}{\rho\text{SWIR2} + \rho NIR} + 1$	10	سنتینل 2A Sentinel2A	UI[2]
Ling et al., 2022	$\frac{SI + NDBI}{2}$	10	سنتینل 2A Sentinel2A	NDBSI[3]
Zha, Gao & Ni, 2003; Kaimaris & Patias, 2016; Dapke et al., 2025	$\frac{\rho NIR - \rho red}{\rho NIR + \rho red}$	10	سنتینل 2A Sentinel2A	NDBI[4]
Kaimaris & Patias, 2016; Bouhennache, Bouden, Taleb-Ahmed & Cheddad, 2019	$\left[\frac{2\rho\text{SWIR1}}{(\rho\text{SWIR1} + \rho\text{NIR})} - \frac{\rho\text{NIR}}{(\rho\text{NIR} + \rho\text{Red})} - \frac{\rho\text{Green}}{(\rho\text{Green} + \rho\text{SWRI1})}\right] / \left[\frac{2\rho\text{SWIR1}}{(\rho\text{SWIR1} + \rho\text{NIR})} + \frac{\rho\text{NIR}}{(\rho\text{NIR} + \rho\text{Red})} + \frac{\rho\text{Green}}{(\rho\text{Green} + \rho\text{SWRI1})}\right]$	10	سنتینل 2A Sentinel2A	IBI[5]
Kaimaris & Patias, 2016	$\frac{\rho red - \rho SWIR1}{\rho NIR}$	10	سنتینل 2A	NBI[6]
Dapke et al., 2025	$\frac{\rho NIR - \rho SWIR1}{\rho NIR + \rho SWIR1}$	10	سنتینل 2A	[7]NDMI
Yu, Yang, Jiang, Zhan & Zhan, 2024a; Sun et al., 2015	$\frac{\rho Green - \rho NIR}{Green + \rho NIR}$	10	سنتینل 2A	[8]NDWI
	$\frac{\rho Green - \rho SWIR1}{Green + \rho SWIR1}$	10	سنتینل 2A	[9]MNDWI
Yu et al., 2024b	$\frac{\rho NIR - \rho Red}{\rho NIR + \rho Red}$	10	سنتینل 2A	[10]NDVI
Yaghoobi, Vafaeenejad, Moradi & Hashemi, 2022	$\frac{(\rho NIR - \rho Red)(1+L)}{\rho NIR + \rho Red + L}$, $L=0.5$	10	سنتینل 2A	SAVI[11]
Sun et al., 2015	$\frac{(\rho SWIR1 + \rho Red) - (\rho NIR + \rho Blue)}{(\rho SWIR1 + \rho Red) + (\rho NIR + \rho Blue)}$	10	سنتینل 2A	[12]SI

1- built-up land features extraction index
2- Urban Index
3- Normalized Difference Bare Soil Index
4- Normalized Built-up Index (NDBI)
5- Index-based Built-up Index
6- New Built up Index
7- Normalized Difference Moisture Index
8- Normalized Difference Water Index
9- Modified Normalized Difference Water Index
10- Normalized Difference Vegetation Index
11- Soil Adjusted vegetation Index
12- Surface Impermeability

اثر خنک‌کنندگی لکه‌های سبز (GSCEI)

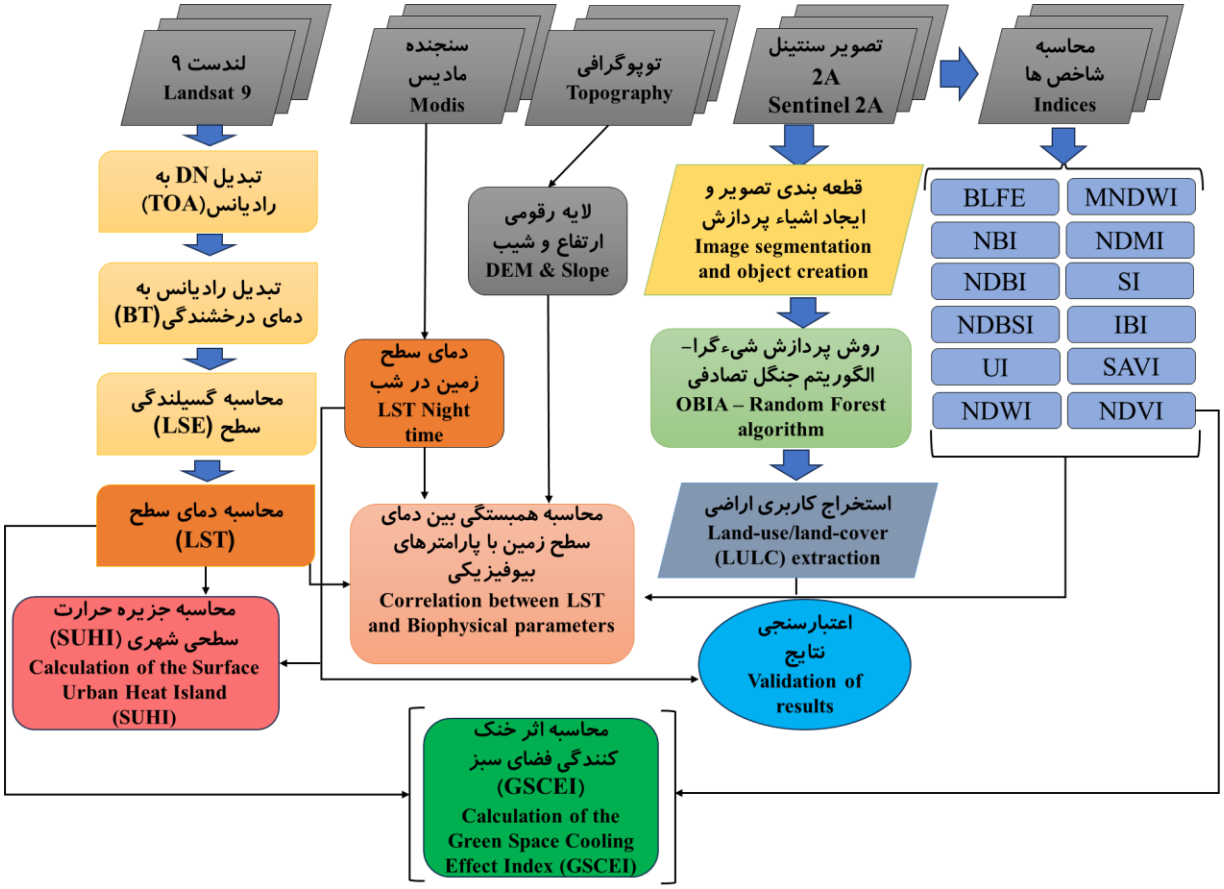
این شاخص میزان اثر خنک‌کنندگی لکه‌های سبز را روی مناطق اطرافشان بررسی می‌کند که از طریق رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$GSCEI = LST_{buffer} - LST_{green\ space} \quad (۳)$$

LST_green : میانگین دمای سطح در محدودهٔ فضای سبز

LST_surrounding: میانگین دمای سطح در حریم اطراف آن (در این پژوهش فواصل ۱۰۰ متر شعاعی از محدوده‌های فضای سبز در نظر گرفته شده است)

مقادیر بالاتر GSCEI نشان‌دهنده اثر خنک‌کنندگی قوی‌تر فضای سبز است، در حالی که مقادیر پایین یا منفی بیانگر تأثیر ضعیف یا قرارگیری فضای سبز در مناطق گرم است (Li, Zhou, Zhao & Zhao, 2020).



شکل ۲- فلوچارت کلی تحقیق

Fig. 2. General Flowchart of the Research

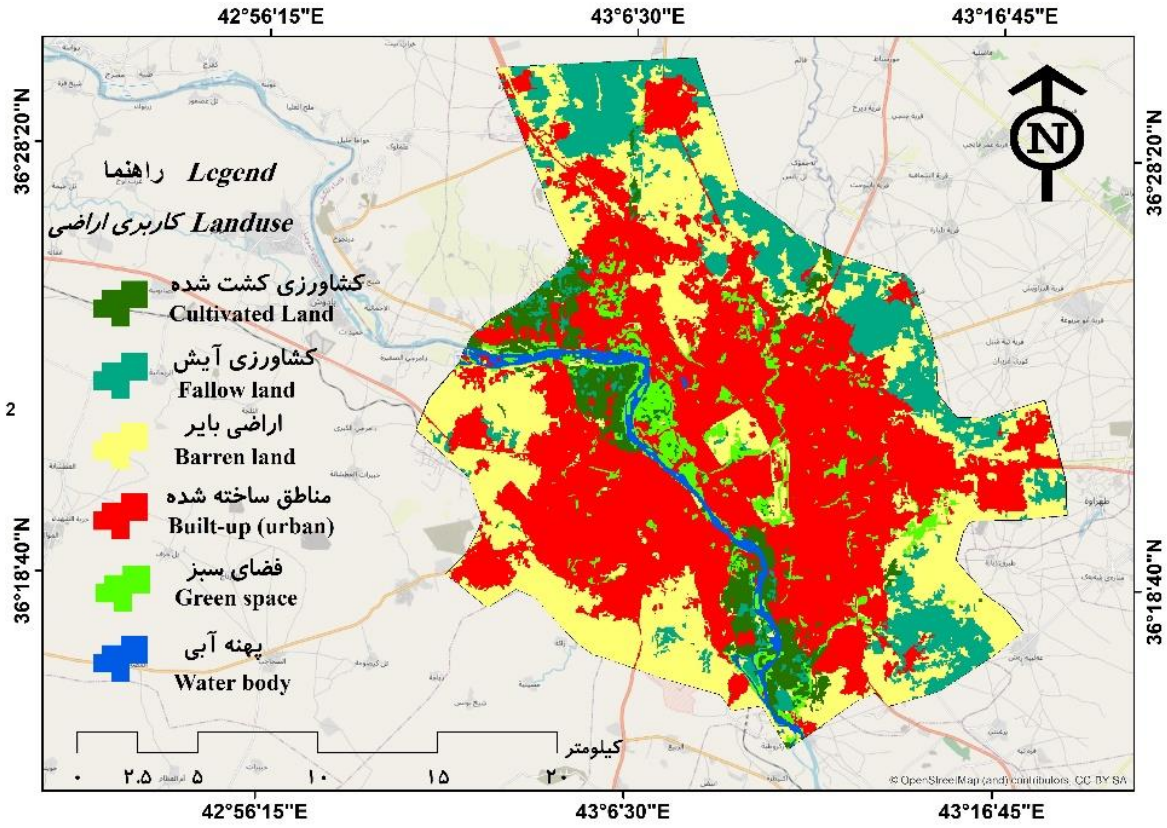
نتایج و بحث

طبقه‌بندی شیءگرا -الگوریتم جنگل تصادفی

برای درک بهتر الگوهای حرارتی و تفکیک نواحی شهری از اراضی طبیعی و کشاورزی، ابتدا نقشهٔ کاربری اراضی شهر موصل (شکل ۳) تهیه شد. این نقشه مبنای تفسیر نقشه‌های دمای سطح زمین و سایر شاخص‌های حرارتی قرار گرفت. نتیجهٔ نهایی حاصل

از اعمال الگوریتم جنگل تصادفی در محیط نرم افزار اکوگنیشن جهت طبقه‌بندی و استخراج کاربری اراضی در سال ۲۰۲۴ در شکل ۳ و جدول ۳ ارائه شده است. مطابق نتیجهٔ به دست آمده، دمای سطح زمین (LST) در چهار بازهٔ روزانه و شبانه، تابستان و زمستان نشان داد که نوع کاربری اراضی تأثیر مهمی بر الگوی حرارتی موصل دارد؛ در تابستان، کاربری‌های صنعتی و تجاری (با دمای روزانه ۳۸.۱۹۹ °Cو شبانه ۴۳.۰۰۷°C) و همچنین مناطق مسکونی متراکم به دلیل تراکم مصالح جذب‌کننده گرما، کمبود پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی بالاترین دما را ثبت کردند، در حالی که فضاهای سبز و کشاورزی (با دمای روزانه ۲۹.۱۳۱ °Cو شبانه ۳۱.۰۵۵ °C) نقش خنک‌کنندگی قابل توجهی داشتند؛ این تفاوت‌ها به‌ویژه در شب، پدیده جزیره حرارتی شهری را تشدید می‌کند زیرا مناطق غیرسبز گرمای ذخیره‌شدهٔ روز را بازتاب می‌دهند. در زمستان نیز همین الگو با شدت کمتر تکرار شد؛ به‌طوری که فضاهای طبیعی سردترین و مناطق صنعتی و مسکونی همچنان گرم‌ترین بودند که نشان‌دهندهٔ ظرفیت بالای نگهداری گرما در این کاربری‌هاست.

این یافته‌ها پیامدهای گسترده‌ای در آسایش حرارتی، مصرف انرژی و برنامه‌ریزی شهری دارند و بر ضرورت سیاست‌گذاری برای ایجاد تعادل میان فضاهای ساخته شده و سبز، توسعه لکه‌های سبز در مناطق متراکم و طراحی هوشمند اقلیمی شهری با انتخاب مناسب موقعیت، تراکم و مصالح ساختمانی تأکید می‌کنند.



شکل ۳-کاربری اراضی شهر موصل-۲۰۲۴

Fig. 3. Land use of Mosul city – 2024

دمای سطح زمین (LST)

دمای سطح زمین برای چهاردهم ماه ژوئیه ۲۰۲۴ (۲۴ام تیر ۱۴۰۲) در شکل‌های ۴ و ۵ و ۲۸ام ژانویه ۲۰۲۴ (۸ام بهمن ۱۴۰۲) در شکل‌های ۶ و ۷ که شهر موصل بیشترین و کمترین دما را تجربه کرده، در دو بازهٔ روزانه و شبانهٔ این تاریخ مورد پردازش قرار گرفت. پیش از تحلیل نقشه‌های دمای سطح زمین، داده‌های دمایی ایستگاه همدیدی فرودگاه موصل به عنوان نمایندهٔ شرایط شهری بررسی شد. از آن‌جا که ایستگاه دمایی مجزایی برای حومه وجود نداشت، مقادیر متناظر مناطق غیرشهری از میانگین پیکسل‌های مناطق روستایی و بایر اطراف شهر (بر اساس تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ و مودیس) استخراج شد. داده‌های روزانه مربوط به زمان عبور ماهواره لندست ۹ در حدود ساعت ۱۰:۳۰ صبح و داده‌های شبانه مربوط به MODIS در حدود ساعت ۲۲:۳۰ شب (به‌وقت محلی) هستند. در تابستان ۲۰۲۴، میانگین دمای سطح در محدوده شهری حدود ۴۱ تا ۴۳ درجه سلسیوس و در مناطق غیرشهری حدود ۳۷ تا ۳۸ درجه سلسیوس برآورد شد؛ در حالی‌که در زمستان این مقادیر به ترتیب ۱۱ تا ۱۸ و ۸ تا ۱۰ درجه سلسیوس بوده است. این اختلاف نشان‌دهندهٔ وجود پدیدهٔ جزیرهٔ حرارتی شهری، به ویژه در دوره‌های شبانهٔ تابستان است.

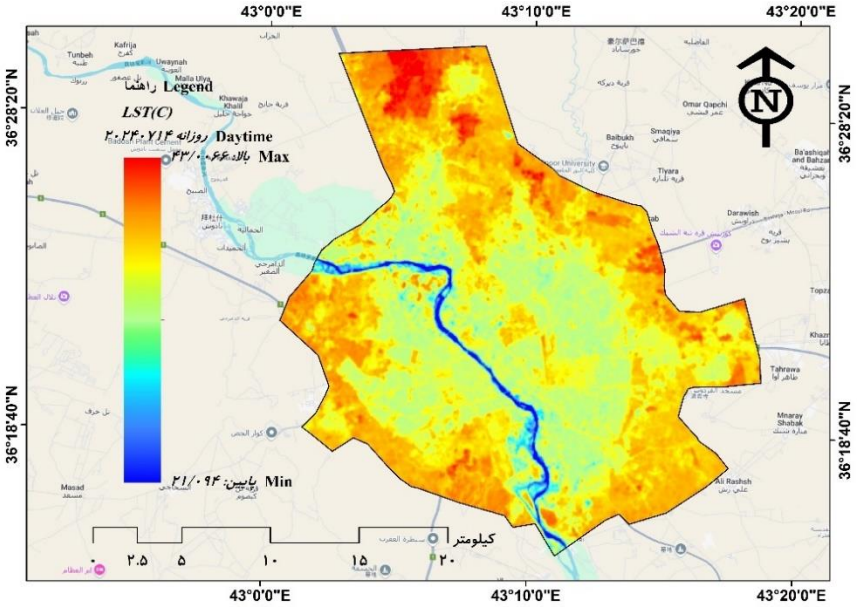
جدول ۳-تأثیر کاربری اراضی بر دمای سطح

Table 3- Impact of Land Use on Land Surface Temperature

ویژگی	کاروی نوع		آبجکت تعداد	مساحت(هکتار)	کمینه	بیشینه	دامنه	میانگین	معیار انحراف
Feature	Land-use type		Object Number	Area (hec)	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD
دمای روزانه سطح زمین تابستان LST Day time Summer	Built-up (urban)	شده ساخته(شهری)	225086	20264.14	22.483	42.047	19.564	34.671	1.492
	Barren land	بایر ارطی	133986	12091.93	23.599	42.572	18.973	37.471	1.360
	Fallow land	آیش اکشاورزی	67846	6120.25	27.282	43.007	15.725	38.199	1.806
	Green space	سبز فضای	25793	2321.11	21.586	40.778	19.191	33.583	2.310
	Cultivated land	شده کشتکشاورزی	27922	2513.77	21.823	39.904	18.081	34.007	2.450
	Water body	آبی پهنه	9465	852.03	21.094	37.845	16.751	26.100	3.159
دمای شبانه سطح زمین تابستان LST Night time Summer	Built-up (urban)	شده ساخته(شهری)	225049	20264.14	23.920	31.055	7.135	29.131	1.379
	Barren land	بایر ارطی	133798	12091.93	23.418	31.055	7.636	27.947	1.436
	Fallow land	آیش اکشاورزی	67880	6120.25	23.702	30.618	6.916	26.434	1.140
	Green space	سبز فضای	25778	2321.11	23.702	31.055	7.353	27.960	1.905
	Cultivated land	شده کشتکشاورزی	27905	2513.77	23.702	31.055	7.353	26.206	1.303
	Water body	آبی پهنه	9466	852.03	23.702	29.658	5.956	25.940	1.270
دمای روزانه سطح زمین زمستان LST Day time Winter	Built-up (urban)	شده ساخته(شهری)	225086	20264.14	-0.572	15.999	16.571	12.155	0.899
	Barren land	بایر ارطی	133986	12091.93	8.749	18.292	9.543	13.516	0.708
	Fallow land	آیش اکشاورزی	67846	6120.25	9.962	16.303	6.340	13.519	0.818
	Green space	سبز فضای	25793	2321.11	9.583	16.091	6.508	12.683	0.977
	Cultivated land	شده کشتکشاورزی	27922	2513.77	10.250	15.671	5.421	13.008	0.761
	Water body	آبی پهنه	9465	852.03	9.867	15.277	5.411	12.011	1.114
دمای شبانه سطح زمین زمستان LST Night time Winter	Built-up (urban)	شده ساخته(شهری)	80984	20264.14	5.570	9.890	4.320	8.446	0.820
	Barren land	بایر ارطی	48244	12091.93	5.350	9.790	4.440	7.295	0.753
	Fallow land	آیش اکشاورزی	24379	6120.25	5.350	9.150	3.800	6.556	0.620
	Green space	سبز فضای	9310	2321.11	6.030	9.890	3.860	8.389	0.710
	Cultivated land	شده کشتکشاورزی	10072	2513.77	5.430	9.790	4.360	7.643	0.826
	Water body	آبی پهنه	3415	852.03	6.930	9.770	2.840	8.526	0.646

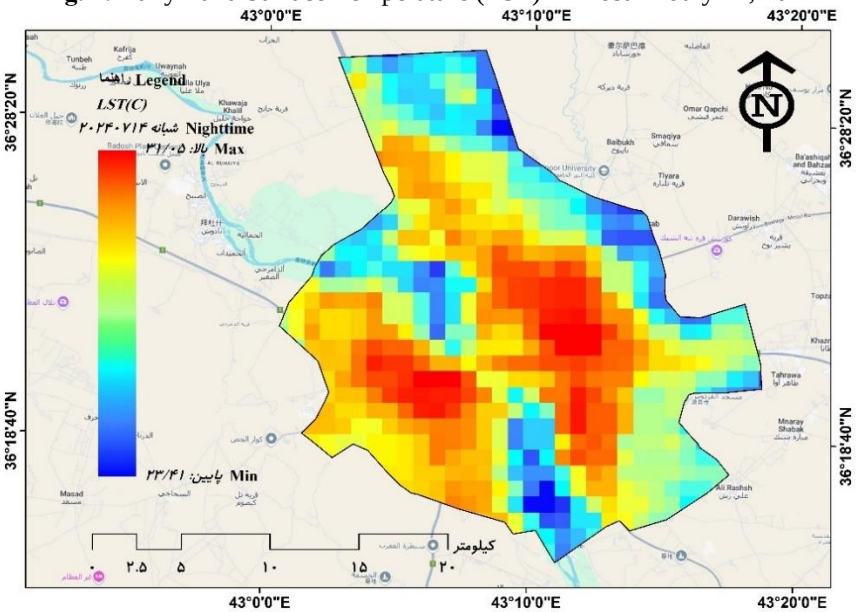
در ادامهٔ نتایج آورده شده است. اشکال ۴تا۷ دمای سطح زمین را به صورت روزانه و شبانه در دو فصل تابستان و زمستان در شهر موصل نشان می‌دهند. نتایج LST روز و شب در موصل (۱۴ ژوئیه ۲۰۲۴) نشان می‌دهند که برخلاف الگوی معمول، حاشیه‌های شهر در روز داغ‌تر از مرکز هستند که به سطوح خاکی و بی‌پوشش مربوط می‌شود. در شب، مناطق مرکزی و جنوب‌شرقی گرمای بیشتری نگه می‌دارند که ناشی از اثر جزیرهٔ حرارتی شهری است. تحلیل گرادیان دمایی شرق- غرب و شمال- جنوب تفاوت‌های فضایی معناداری را نشان می‌دهد. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که کاربری زمین نقش تعیین‌کننده‌ای در الگوی دمایی دارد: سطوح خاکی و

بی‌پوشش در حاشیه، بیشترین جذب حرارت روزانه را دارند، در حالی‌که نواحی متراکم مرکزی به دلیل ظرفیت حرارتی بالای مصالح، گرمای شبانه را حفظ می‌کنند. تفاوت گرمایش روزانه و سرمایش شبانه میان دو پهنه، منشأ اصلی ایجاد الگوهای دمایی ناهمگن در محدوده شهری موصل است. این پدیده‌ها بر سلامت، مصرف انرژی و منابع آبی اثر منفی دارند. کناره‌های رودخانه دجله نیز که از میان بافت مرکزی شهر عبور می‌کند، به‌عنوان یکی از عناصر آبی خنک‌کننده نقش مهمی در کاهش دمای سطحی دارند. وجود آب، رطوبت نسبی بالاتر و پوشش گیاهی حاشیه‌ای سبب ایجاد نوارهای خنک‌تر در مقایسه با نواحی پیرامونی خشک شهر شده است.



شکل ۴–دمای روزانهٔ سطح زمین (LST) در شهر موصل-۱۴ ژوئیه ۲۰۲۴

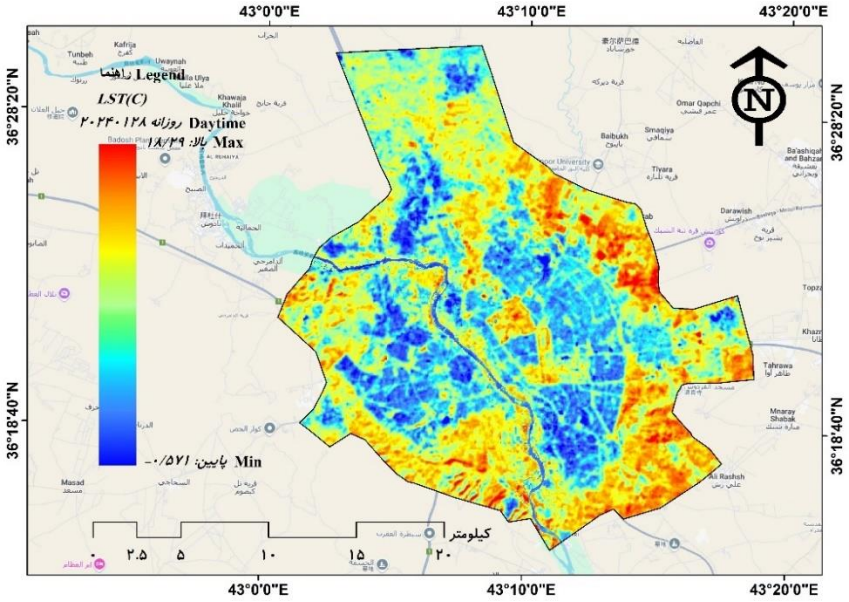
Fig. 4. Daily Land Surface Temperature (LST) in Mosul – July 14, 2024



شکل۵– دمای شبانه سطح زمین (LST) در شهر موصل-۱۴ ژوئیه ۲۰۲۴

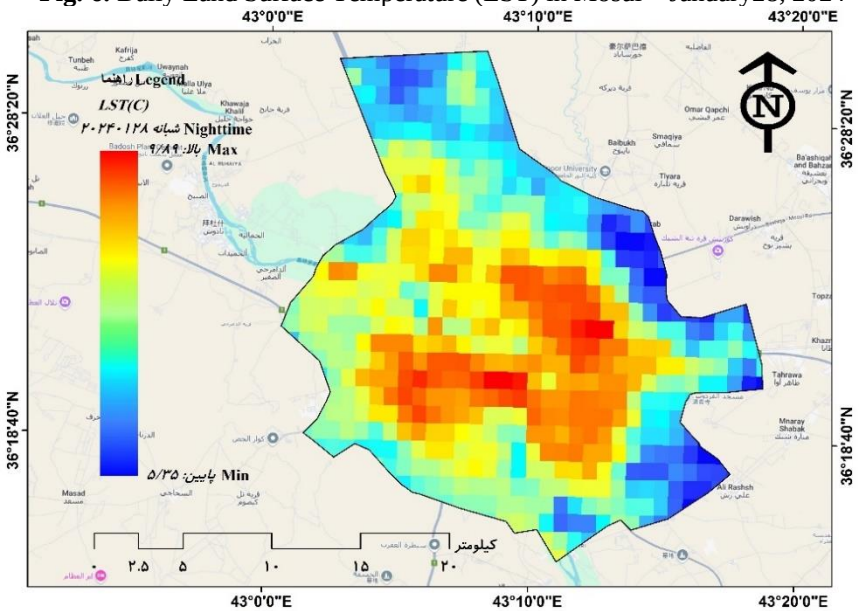
Fig. 5. Nighttime Land Surface Temperature (LST) in Mosul – July 14, 2024

در نقشهٔ روز زمستانی موصل (۲۸ ژانویه)، بیشتر مناطق به ویژه مرکز و اطراف دجله دمای پایینی دارند، در حالی‌که حاشیه‌های خشک شمالی و شرقی کمی گرم‌ترند. تغییرات دما در هر دو جهت شرق- غرب و شمال- جنوب ملایم بوده و به یکنواختی زمینی و تابش ضعیف زمستانی مرتبط است. در شب، نواحی مرکزی و جنوبی گرما را حفظ می‌کنند و اثر جزیره حرارتی شهری ظاهر می‌شود. در مقابل، مناطق شمالی و پوشش‌دار به‌سرعت سرد می‌شوند.



شکل ۶- دمای روزانه سطح زمین (LST) در شهر موصل-۲۸ ژانویه ۲۰۲۴

Fig. 6. Daily Land Surface Temperature (LST) in Mosul – January28, 2024



شکل ۷- دمای شبانه سطح زمین (LST) در شهر موصل-۲۸ ژانویه ۲۰۲۴

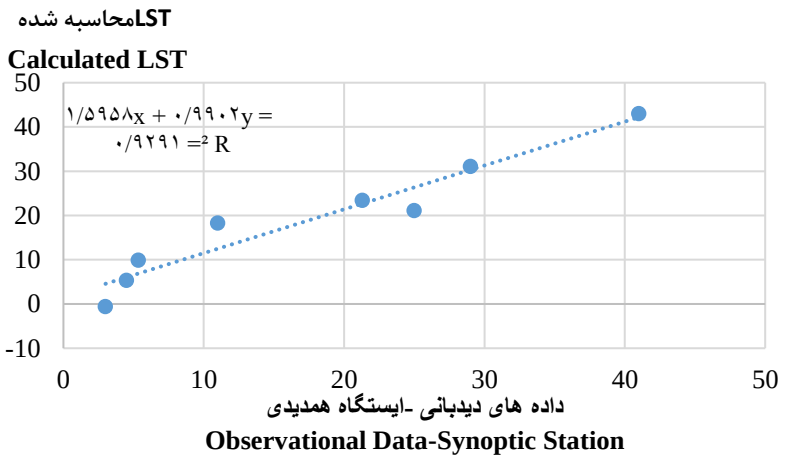
Fig. 7. Nighttime Land Surface Temperature (LST) in Mosul – January28, 2024

شکل ۸ برازش داده های زمینی دمای داده‌های ایستگاه همدیدی فرودگاه موصل برای تاریخ های ۱۴ ژوئیه و ۲۸ ژانویه در جدول ۴ ارائه شده است. ایستگاه همدیدی فرودگاه موصل با داده‌های محاسبه شده دما در زمان‌های روز و شب تابستان و زمستان را نشان می‌دهد که با ضریب تبیین ۰/۹۲ نشان از برازش خوب داده‌ها و بالا بودن دقت محاسبات مربوط به LST در شهر موصل عراق می‌باشد.

جدول۴- داده‌های مربوط به دما (درجه سلسیوس) در ایستگاه همدید فرودگاه موصل

Table 4- Temperature Data from the Mosul Airport Synoptic Station

LST محاسبه شده Calculated LST	**داده های دیدبانی** Observational Data	**ایستگاه همدیدی فرودگاه موصل** Mosul Airport Synoptic Station
43	41	**حداکثر دما روزانه تابستان** Summer daytime maximum temperature
31.0545	29	**حداکثر دما شبانه تابستان** Summer nighttime maximum temperature
18.2922	11	**حداکثر دما روزانه زمستان** Winter daytime maximum temperature
9.89	5.33	**حداکثر دمای شبانه زمستان** Winter nighttime maximum temperature
21.09	25	**حداقل دما روزانه تابستان** Summer daytime minimum temperature
23.4182	21.3	**حداقل دما شبانه تابستان** Summer nighttime minimum temperature
-0.5719	3	**حداقل دمای روزانه زمستان** Winter daytime minimum temperature
5.35	4.5	**حداقل دمای شبانه زمستان** Winter nighttime minimum temperature
0.963908		**همبستگی** Correlation
0.92		**ضریب تبیین** Coefficient of determination (R2)

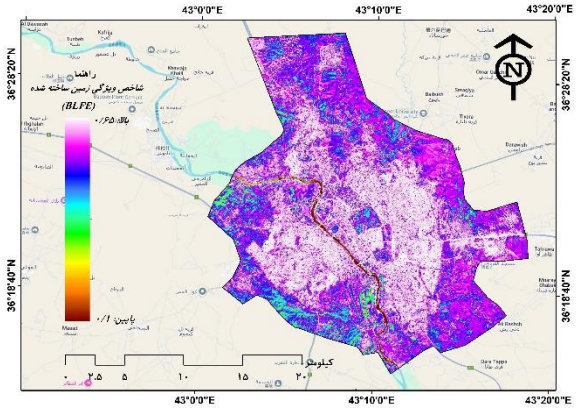


شکل ۸- همبستگی بین داده‌های ایستگاه همدیدی و دمای سطح زمین

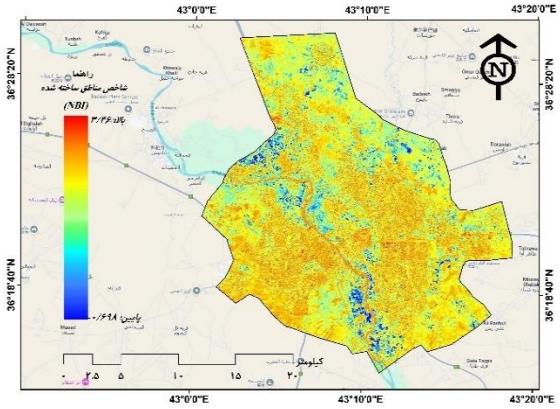
Fig. 8. Correlation between Synoptic Station Data and Land Surface Temperature (LST)

نتایج شاخص‌های بیوفیزیکی سطح

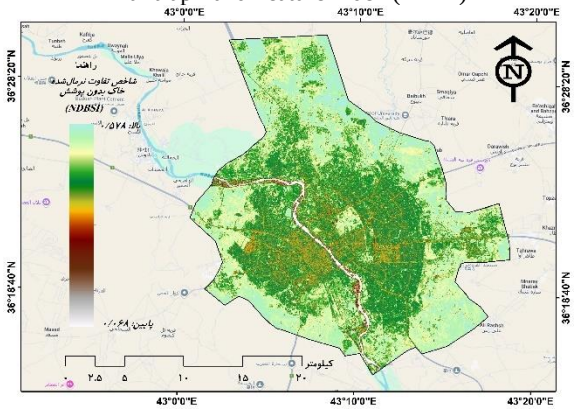
در این بخش، نتایج حاصل از محاسبه و تحلیل شاخص‌های مختلف سنجش از دور و GIS، شامل BLFE، NBI، NDBI، NDBSI، UI، NDWI، MNDWI، NDMI، SI، NDVI، SAVI و IBI در ارتباط با الگوهای فضایی جزایر حرارتی شهری در شهر موصل ارائه شده است. این شاخص‌ها به منظور بررسی تأثیر توزیع لکه‌های سبز شهری و ویژگی‌های بیوفیزیکی سطح بر دمای زمین محاسبه شده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهند که شاخص‌های پوشش گیاهی (NDVI و SAVI) و رطوبت (NDWI، MNDWI، NDMI) رابطهٔ معکوس با دمای سطح زمین دارند، در حالی‌که شاخص‌های سطوح نفوذناپذیر (UI و NDBI) و شاخص‌های بیوفیزیکی دیگر (NDBSI و SI) ارتباط مستقیمی با تشدید جزایر حرارتی نشان می‌دهند. این نتایج، درک جامعی از عوامل مؤثر بر جزایر حرارتی شهری ارائه می‌کند و می‌تواند به عنوان مبنایی برای برنامه‌ریزی‌های محیط‌زیستی در شهر موصل مورد استفاده قرار گیرد. شکل ۹ شاخص‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، شاخص‌های بیوفیزیکی سطح در شهر موصل الگوهای مکانی متفاوتی را نشان می‌دهند. در هستهٔ مرکزی شهر که تراکم ساختمانی بالا و پوشش گیاهی محدود است، شاخص‌های مرتبط با سطوح ساخته شده مانند BLFEI، NBI، NDBI، NDBSI، UI، SI و IBI دارای مقادیر بالاتری هستند که بیانگر افزایش سطوح نفوذناپذیر، تراکم کالبدی و دمای سطح بالاتر است. در مقابل، در مناطق پیرامونی و حومه شهر که زمین‌های کشاورزی، فضاهای سبز و رودخانهٔ دجله قرار دارند، شاخص‌های NDVI، SAVI، NDWI، MNDWI و NDMI مقادیر بالاتری را نشان می‌دهند که حاکی از پوشش گیاهی و رطوبت بیشتر و در نتیجه دمای سطح پایین‌تر است. این الگوی متضاد بین مرکز و پیرامون، به خوبی نقش ساخت‌وساز و کاهش منابع طبیعی را در تشدید جزایر حرارتی شهری موصل نشان می‌دهد.



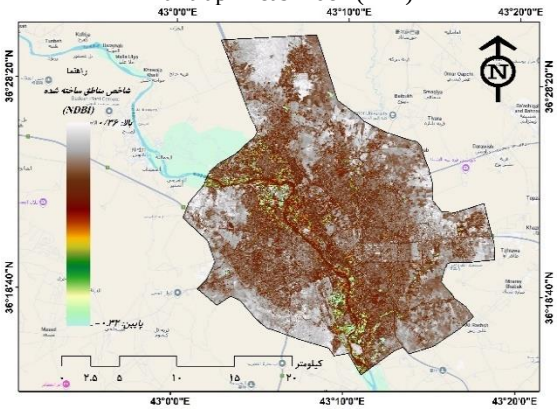
شاخص ویژگی زمین ساخته شده (BLFE)
Built-up Land Feature Index (BLFE)



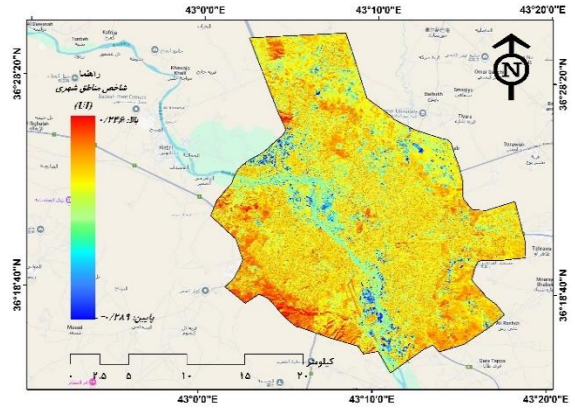
شاخص مناطق ساخته شده (NBI)
Built-up Areas Index (NBI)



شاخص تفاوت نرمال شده خاک بدون پوشش (NDBSI)
Normalized Difference Bare Soil Index (NDBSI)

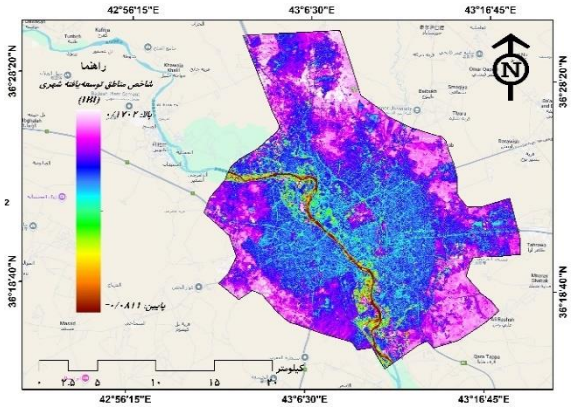


شاخص مناطق ساخته شده (NDBI)
Built-up Area Index (NDBI)



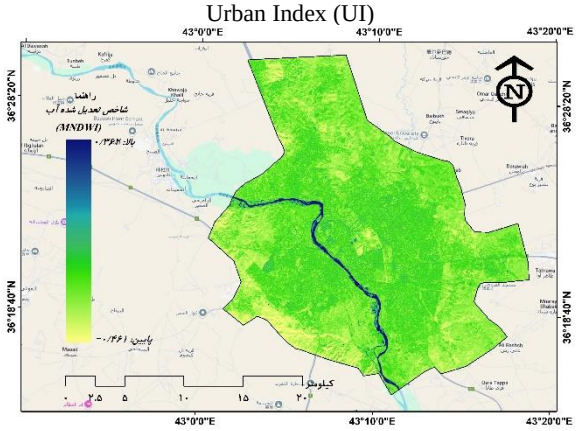
شاخص مناطق شهری (UI)

Urban Index (UI)



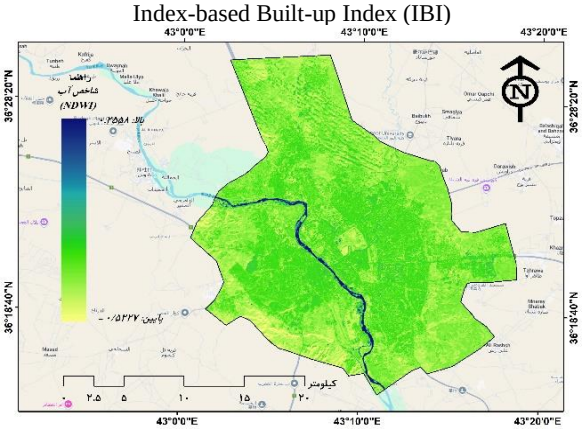
شاخص بر مبنای مناطق ساخته شده (IBI)

Index-based Built-up Index (IBI)



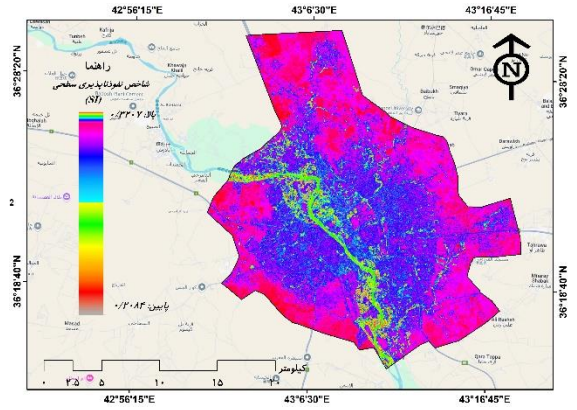
شاخص تعدیل شده آب (MNDWI)

Modified Normalized Difference Water Index



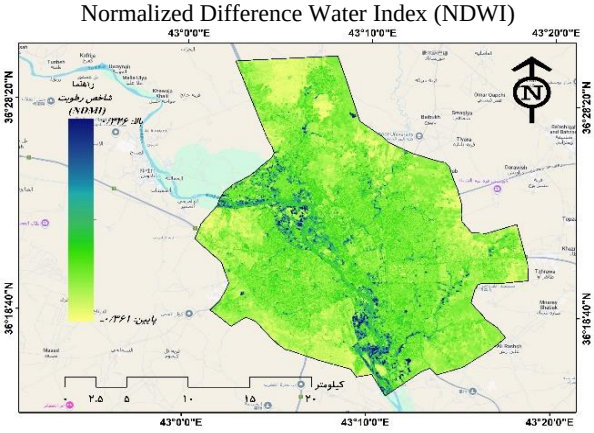
شاخص تفاوت نرمال شده آب (NDWI)

Normalized Difference Water Index (NDWI)



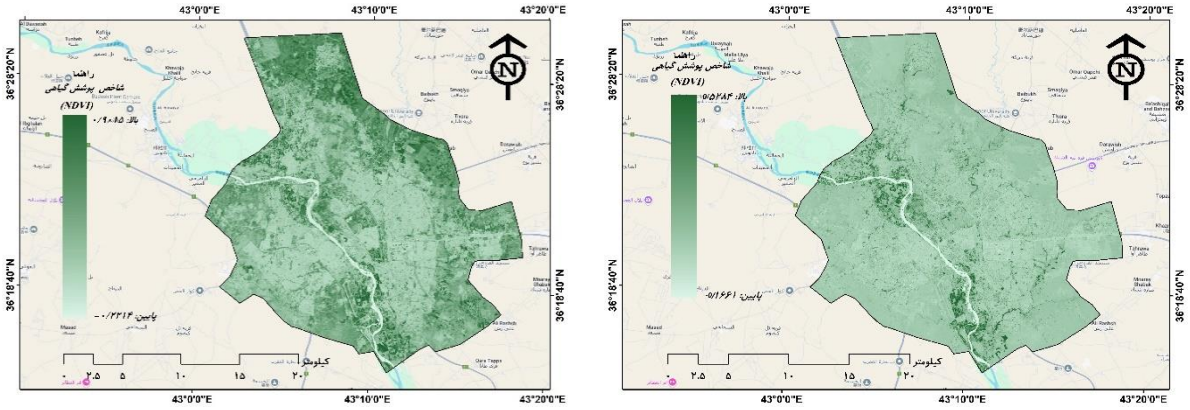
شاخص نفوذناپذیری سطحی

Surface Impermeability Index (SI)



شاخص رطوبت (NDMI)

Normalized Difference Moisture Index (NDMI)

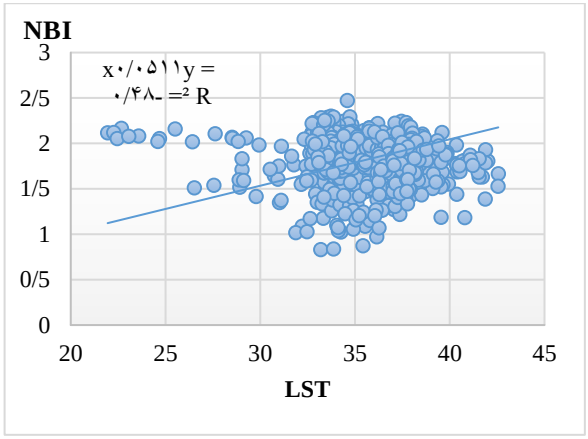


شاخص پوشش گیاهی (NDVI)-**۱۴ژوئیه**
Normalized Difference Vegetation Index– July 14

شاخص پوشش گیاهی (NDVI)-**۲۸ ژانویه**
Normalized Difference Vegetation Index – January 28

شکل ۹- شاخص‌های بیوفیزیکی سطح
Fig. 9. Surface Biophysical Indices

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، بین شاخص‌های پوشش گیاهی (شکل۹-د؛ NDVI و۹-ذ؛ SAVI) و دمای سطح زمین (LST) رابطهٔ منفی قوی وجود دارد، در حالی که شاخص‌های سطوح نفوذناپذیر (شکل۹-ت؛ NDBI و۹-خ؛ SI) رابطهٔ مثبت و معناداری با دما نشان می‌دهند. این همبستگی‌ها بیانگر آن است که افزایش پوشش گیاهی باعث کاهش دمای سطح و در مقابل، افزایش مناطق ساخته‌شده موجب تشدید جزایر حرارتی شهری می‌شود. تحلیل شاخص‌های بیوفیزیکی و پوشش زمین در ارتباط با دمای سطح زمین (LST) به عنوان متغیر کلیدی بیانگر شدت جزایر حرارتی، اهمیت فراوانی دارد. بررسی ضریب تعیین بین LST و شاخص‌های منتخب، نشان داد که شاخص NBI یا میزان توسعه یافته بودن مناطق ساخته‌شده (شکل ۹-ب)، با ضریب تعیین بسیار بالا (۰.۹۷۶۵)، بیشترین قدرت تبیین دمای سطحی را دارد و به‌وضوح ارتباط قوی توسعه فیزیکی شهری با گرمایش سطح زمین را تأیید می‌کند. این یافته تأکیدی است بر آنکه گسترش مناطق ساختمانی در موصل، نقش مستقیمی در تقویت پدیدهٔ جزایر حرارتی ایفا می‌کند. به‌خصوص در هستهٔ مرکزی شهر، که تراکم ساختمانی و کاهش نفوذپذیری سطح بالاست، این اثر تشدید می‌شود. همچنین شاخص‌های مرتبط با منابع آبی مانند (شکل۹-چ؛ NDWI وشکل۹-ج؛ MNDWI) با ضرایب تعیین به‌ترتیب ۰.۹۰۰۶ و ۰.۸۲۰۶، تأثیر بسیار منفی و معناداری در کاهش دمای سطح دارند که نشان‌دهندهٔ نقش تعدیل‌کنندهٔ منابع آبی در خنک‌سازی سطح زمین است. این یعنی لکه‌های آبی و سطوح مرطوب (نظیر رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، و زمین‌های آبیاری‌شده)، توانایی چشمگیری در تلطیف حرارتی دارند و حضور آن‌ها می‌تواند شدت SUHI را به طور محسوس کاهش دهد. در نقطهٔ مقابل، شاخص‌هایی نظیر UI (شاخص توسعه شهری) (شکل۹- ث) با مقدار بسیار پایین ۰.۰۵۸۵ و BLFE (شکل۹- الف) با مقدار ۰.۲۳۲۱ تأثیر نسبتاً ضعیفی بر LST داشته‌اند که می‌تواند به دلیل همپوشانی اطلاعاتی یا محدودیت حساسیت آن‌ها در این منطقه خاص باشد.

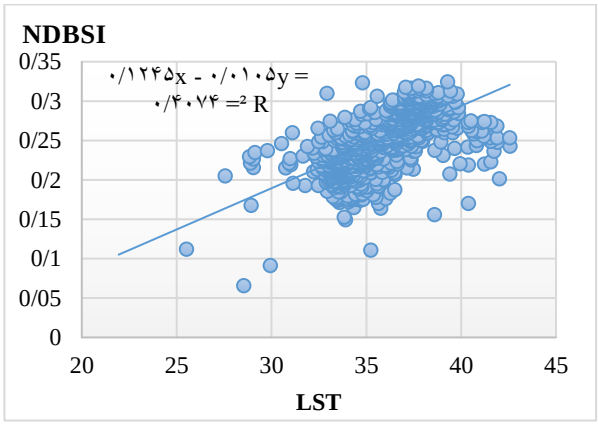


الف. رابطه همبستگی بین BLFEI و LST

a. Correlation between BLFEI and LST

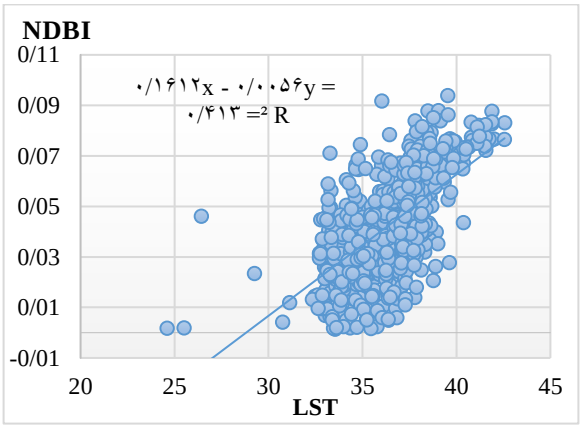
ب. رابطه همبستگی بین NBI و LST

b. Correlation between NBI and LST



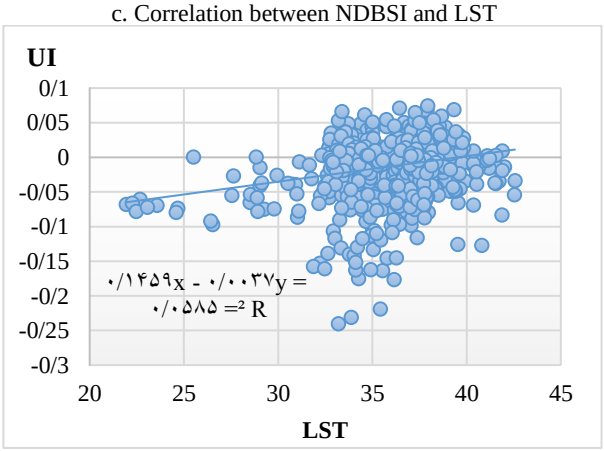
پ. رابطه همبستگی بین NDBSI و LST

c. Correlation between NDBSI and LST



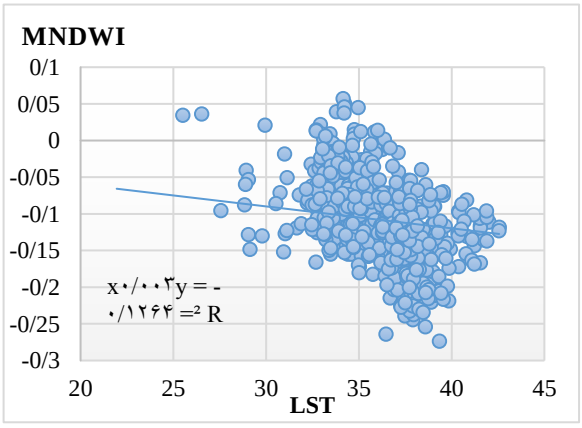
ت. رابطه همبستگی بین NDBI و LST

d. Correlation between NDBI and LST



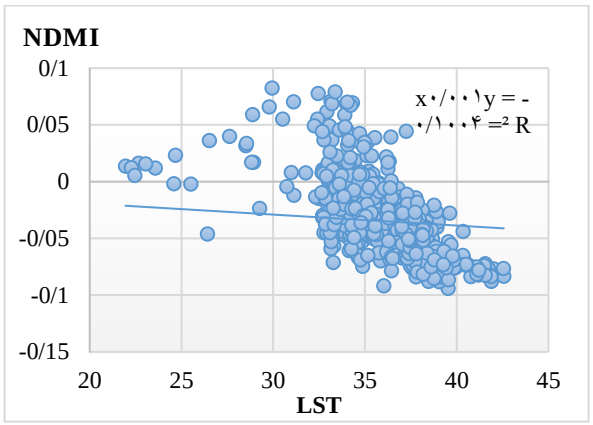
ث. رابطه همبستگی بین UI و LST

e. Correlation between UI and LST



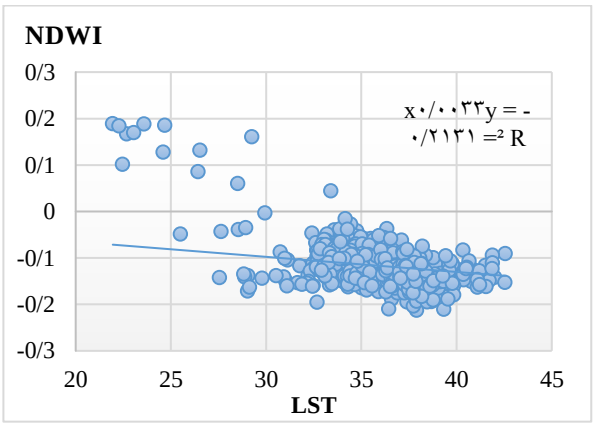
ج. رابطه همبستگی بین MNDWI و LST

f. Correlation between MNDWI and LST



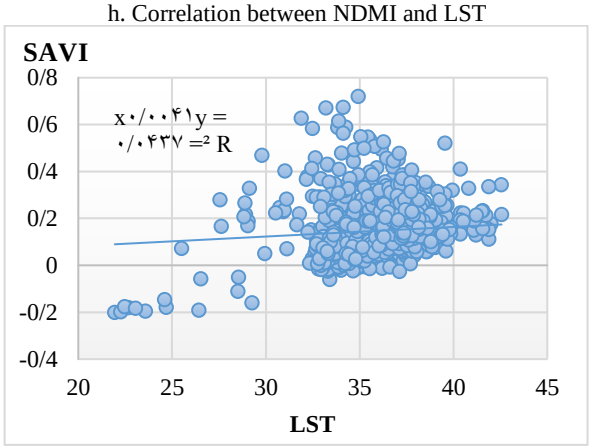
ح. رابطه همبستگی بین NDMI و LST

h. Correlation between NDMI and LST



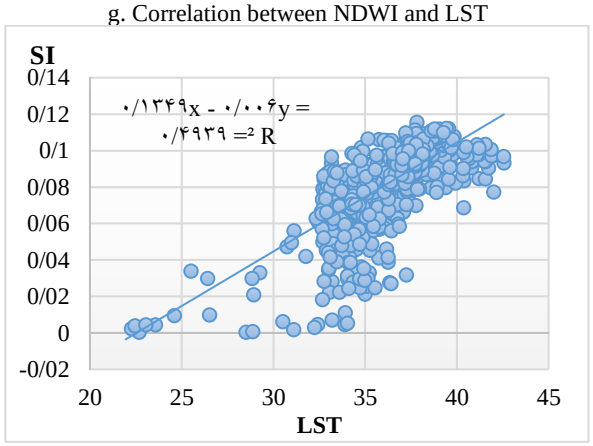
چ. رابطه همبستگی بین NDWI و LST

g. Correlation between NDWI and LST



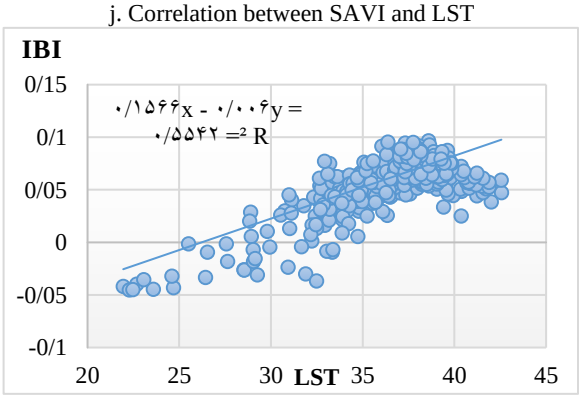
د. رابطه همبستگی بین SAVI و LST

j. Correlation between SAVI and LST



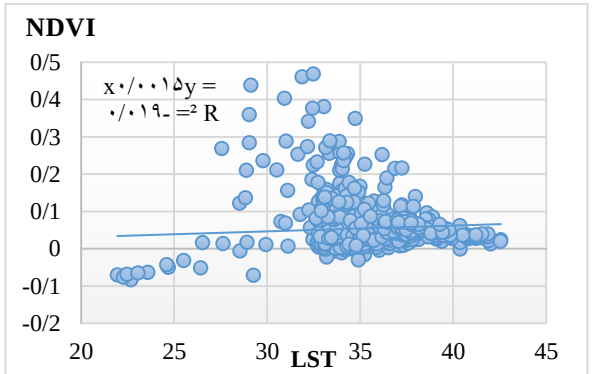
خ. رابطه همبستگی بین SI و LST

i. Correlation between SI and LST



ر. رابطه همبستگی بین IBI و LST

l. Correlation between IBI and LST



ذ. رابطه همبستگی بین NDVI و LST

k. Correlation between NDVI and LST

شکل ۱۰- همبستگی بین شاخص‌ها

Fig. 10. Correlation among the indices

از سوی دیگر، تحلیل ماتریس همبستگی بین متغیرهای بیوفیزیکی و دمای سطح زمین در چهار بازهٔ مختلف زمانی (روز و شب در دو فصل تابستان و زمستان) (جدول ۵)، حاکی از آن است که الگوی همبستگی‌ها تحت تأثیر چرخهٔ زمانی و فصل قرار می‌گیرد. در بررسی ماتریس همبستگی نتایج تقریباً با ضریب تعیین هم‌راستا هستند. شاخص‌هایی مانند NBI با مقدار همبستگی ۰/۴۵۶+ با

LST_SDو SI با ۰/۴۰۳+، رابطه مستقیم و قوی با افزایش دما نشان داده‌اند. در دورهٔ روزانهٔ تابستان(LST_SD)، شاخص‌های گیاهی مانند NDVI_S و SAVI به ترتیب همبستگی‌های منفی ۰.۸۳۳- و ۰.۵۱۷- نشان داده‌اند، که حاکی از نقش حیاتی تأثیر خنک‌کنندگی پوشش گیاهی در کاهش گرمای روز است. این تأثیر در شب کاهش یافته اما همچنان محسوس است. شاخص‌های آبی نظیر NDWI و MNDWI نیز با ضرایب ۰.۲۶۶- و ۰.۸۵۶- نقش تعدیل‌کننده پررنگی در کاهش دما دارند. همچنین، شاخص SI (شاخص نفوذناپذیری سطحی) همبستگی مثبت قابل توجهی با LST در هر دو فصل و بازهٔ زمانی دارد که نشان‌دهندهٔ نقش سطوح سخت و بدون پوشش در افزایش گرمای سطحی می‌باشد. ویژگی‌های توپوگرافی نظیر Slope و DEM نیز با مقادیر همبستگی متوسط تا بالا (DEM: 0.553 و Slope: 0.376) بیانگر آن‌اند که پستی‌بلندی زمین نیز در توزیع دمای سطح مؤثر است، به‌ویژه در مناطق با شیب‌های بالا که امکان تجمع حرارت کمتر است و اهمیت ویژگی‌های فیزیوگرافی در تغییرات دمایی را یادآور می‌شوند. این نکته برای شهر موصل که دارای ساختار توپوگرافی نسبتاً متنوعی است، در تبیین مکان‌یابی لکه‌های سبز و اصلاح گرمای شهری می‌تواند کاربردی باشد. به‌طور کلی، ترکیب نتایج ماتریس همبستگی و ضریب تعیین به‌خوبی نشان می‌دهد که مؤلفه‌هایی مانند ساخت‌وساز، پوشش گیاهی، منابع آبی و ویژگی‌های توپوگرافی اصلی‌ترین عوامل اثرگذار بر شدت و توزیع دمای سطح زمین هستند که باید در برنامه‌ریزی شهری و مدیریت گرمایش شهری به‌طور جدی مدنظر قرار گیرند.

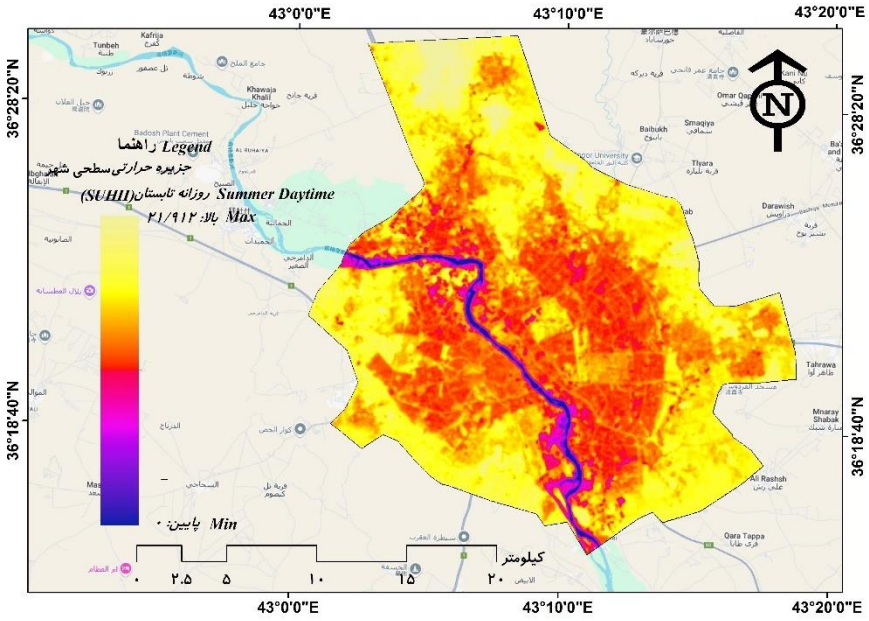
جدول ۵- ماتریس همبستگی بین متغیرهای تحقیق

Table 5- Correlation Matrix of Research Variables

ماتریس همبستگی	LST_SD	LST_SN	LST_WD	LST_WN	BLFE	NBI	NDBI	NDBSI	UI	NDWI_W	MNDWI	NDMI	SI	NDVI_S	NDVI_W	SAVI	IBI	DEM	Slope
LST_SD	1.000	0.449*	-0.018	-0.138	0.081	0.456*	0.035	0.532*	0.107	-0.266	0.866**	0.403*	-0.984**	-0.833**	0.182	0.517**	0.069	0.553**	0.376*
LST_SN	-0.161	1.000	0.110	0.587**	-0.411*	0.329*	0.472*	0.267	0.539**	-0.478*	0.386*	-0.472*	0.474*	-0.433*	-0.242	-0.250	0.318*	0.876**	0.514**
LST_WD	0.546**	-0.376	1.000	-0.559**	-0.377*	-0.211	0.165	0.502**	0.085	-0.489*	-0.503**	-0.165	0.196	0.138	0.441*	0.377*	0.394*	0.102	0.029
LST_WN	-0.579**	0.705**	-0.559**	1.000	0.316*	0.226	-0.193	-0.542**	0.000	0.350*	0.362*	0.193	-0.248	-0.142	-0.508**	-0.310*	-0.438*	-0.355*	0.096
BLFE	-0.052	0.372*	-0.377*	0.316*	1.000	0.158	-0.048	-0.023	0.021	0.020	0.119	0.048	0.040	-0.082	-0.244	-0.238	0.104	0.017	-0.059
NBI	-0.123	0.309*	-0.211	0.226	0.158	1.000	0.209	-0.242	0.859**	0.219	-0.012	-0.209	0.231	-0.440*	-0.712**	-0.855**	0.043	0.119	0.087
NDBI	0.563**	0.070	0.165	-0.193	-0.048	0.209	1.000	0.343*	0.364*	-0.174	-0.284	-1.000**	0.950**	-0.716**	0.023	-0.136	0.591**	0.418*	0.101
NDBSI	0.744**	-0.210	0.502**	-0.542**	-0.023	-0.242	0.343*	1.000	0.163	-0.787**	-0.755**	-0.343*	0.497*	0.212	0.564**	0.451*	0.788**	0.408*	0.035
UI	0.242	0.229	0.085	0.000	0.021	0.859**	0.364*	0.163	1.000	-0.219	0.487*	-0.364*	0.430*	-0.344*	-0.441*	-0.597**	0.360*	0.280	0.142
NDWI_W	-0.642**	0.081	-0.489*	0.350*	0.020	0.219	-0.174	-0.787**	-0.219	1.000	0.846**	0.174	-0.275	-0.298	-0.511**	-0.482*	-0.570**	-0.276	-0.111
MNDWI	-0.686**	0.036	-0.503**	0.362*	0.119	-0.012	-0.284	-0.755**	-0.487*	0.846**	1.000	0.284	-0.397*	-0.150	-0.341*	-0.314*	-0.642**	-0.332*	-0.120
NDMI	-0.563**	-0.070	-0.165	0.193	0.048	-0.209	-1.000**	-0.343*	-0.364*	0.174	0.284	1.000	-0.950**	0.716**	-0.023	-0.136	-0.591**	-0.418*	-0.101
SI	0.621**	0.087	0.196	-0.248	0.040	0.231	0.950**	0.497*	0.430*	-0.275	-0.397*	-0.950**	1.000	-0.675**	0.018	-0.133	0.778**	0.502**	0.093
NDVI_S	-0.102	-0.255	0.138	-0.142	-0.082	-0.440*	-0.716**	0.212	-0.344*	-0.298	-0.150	0.716**	-0.675**	1.000	0.418*	0.485*	0.256	0.258	-0.058
NDVI_W	0.487*	-0.460*	0.441*	-0.508**	-0.244	-0.712**	0.023	0.564**	-0.441*	-0.511**	-0.341*	0.023	0.018	0.418*	1.000	0.810**	0.257	0.104	-0.054
SAVI	0.295	-0.323*	0.377*	-0.310*	-0.238	-0.855**	-0.136	0.451*	-0.597**	-0.482*	-0.314*	0.136	-0.133	0.485*	0.810**	1.000	0.117	-0.062	-0.022
IBI	0.744**	-0.039	0.394*	-0.438*	0.104	0.043	0.591**	0.788**	0.360*	-0.570**	-0.642**	-0.591**	0.778**	-0.256	0.257	0.117	1.000	0.549**	0.042
DEM	0.553**	0.023	0.102	-0.355*	0.017	0.119	0.418*	0.408*	0.280	-0.276	-0.332*	-0.418*	0.502*	-0.258	0.104	-0.062	0.549**	1.000	0.114
Slope	0.092	0.171	0.029	0.096	-0.059	0.087	0.101	0.035	0.142	-0.111	-0.120	-0.101	0.093	-0.058	-0.054	-0.022	0.042	0.114	1.000

شاخص جزیرهٔ گرمایی سطحی شهر (SUHI)

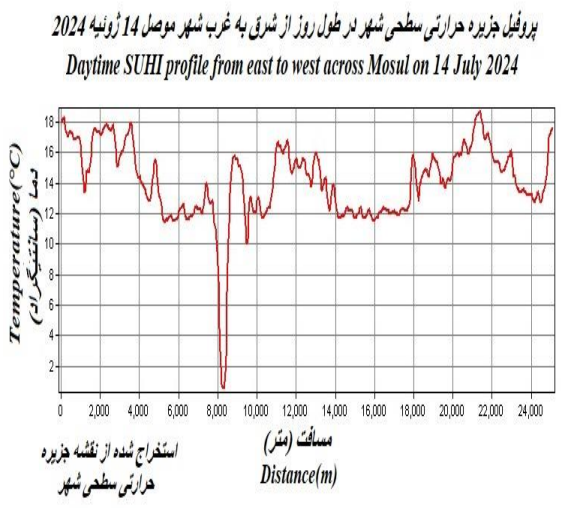
جزیرهٔ گرمای سطحی شهر (SUHI) نتیجهٔ ترکیب عوامل طبیعی و انسانی مانند تابش خورشید، گرمای تولیدشده توسط فعالیت‌های انسانی، مصالح ساختمانی و کاهش فضای سبز است. ساختارهای شهری تابش خورشید را جذب و به آرامی آزاد می‌کنند، در حالی که عوامل مانند آلبِیدو پایین، دید محدود آسمان و کمبود تبخیر- تعرق برای به دام انداختن گرما کمک می‌کنند. مصالح ساختمانی با ظرفیت جذب بالا و آلاینده‌های هوا نیز با جذب و بازتابش گرما، اثر گلخانه‌ای کاذب ایجاد می‌کنند. مطالعات نشان می‌دهند که کاهش پوشش گیاهی (۳۸٪ در توکیو) و طراحی شهری نامناسب از عوامل تشدیدکنندهٔ جزایر حرارتی هستند (Rizwan & Dennis, 2008). این پدیده به دلیل تعامل پیچیده عوامل فیزیکی و انسانی، دمای شهرها را نسبت به مناطق اطراف افزایش می‌دهد. در شکل ۱۱ نقشه جزایر حرارتی شهر موصل در تاریخ ۱۴ ژوئیه ارائه شده است. در این شکل، برخلاف الگوی معمول SUHI، حاشیه‌های شهر داغ‌تر از مرکز آن هستند. این الگو ناشی از وجود زمین‌های بایر، بدون پوشش گیاهی و کشاورزی خشک‌شده در اطراف شهر است که گرمای زیادی جذب می‌کنند. در مقابل، مرکز شهر با وجود تراکم ساختمانی بالا، به دلیل حضور رودخانه دجله، فضای سبز و سایه‌اندازها، دمای سطحی کمتری دارد. مصالح ساختمانی مختلف نیز نقش مهمی در رفتار حرارتی ایفا می‌کنند.



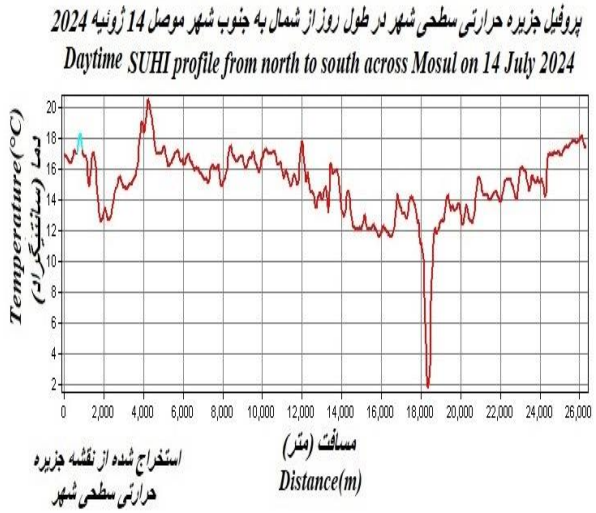
شکل ۱۱- شاخص SUHI روزانهٔ تابستان در تاریخ ۱۴ ژوئیه

Fig. 11. Summer daytime SUHI index on 14 July

در شکل ۱۲ نمودارهای پروفیل SUHI در دو جهت، نوسانات دمایی را با توجه به نوع کاربری اراضی، میزان نفوذپذیری و تراکم ساخت‌وساز نشان می‌دهند. فرورفتگی‌های دمایی در نمودارها ناشی از لکه‌های سبز یا سطوح آبی هستند. کاهش دمای محسوس در مناطق خاص، تأثیر مستقیم پوشش سبز و عناصر خنک‌کننده سطحی را آشکار می‌کند. این تحلیل نشان می‌دهد که شدت SUHI به طور مکانی متغیر است و عوامل بیوفیزیکی نقش کلیدی دارند.



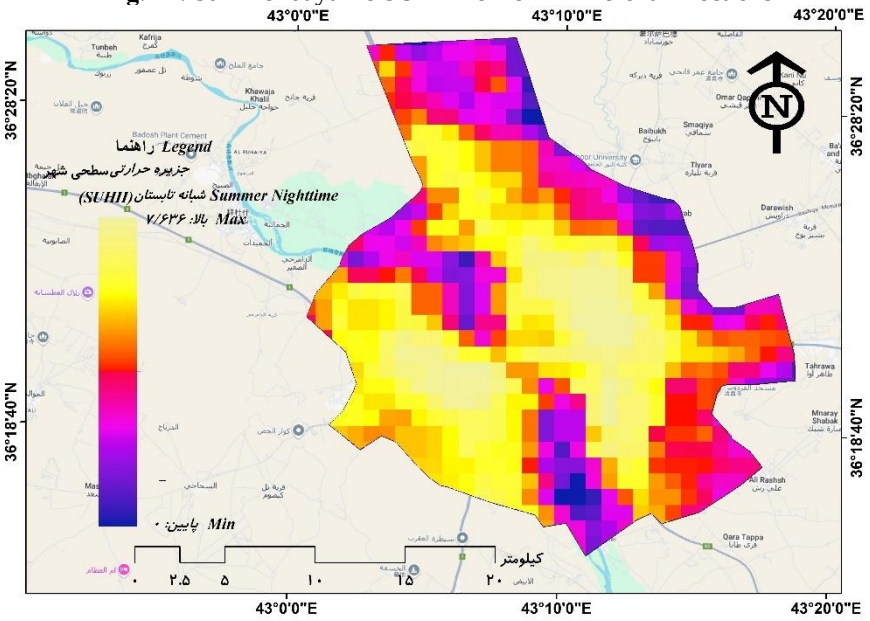
الف–جزیره حرارتی روزانه از شرق به غرب ۱۴ ژوئیه
a. Daily heat island from east to west – July 14



ب–جزیره حرارتی شمال به جنوب روزانه ۱۴ ژوئیه
b. Daily heat island from north to south – July 14

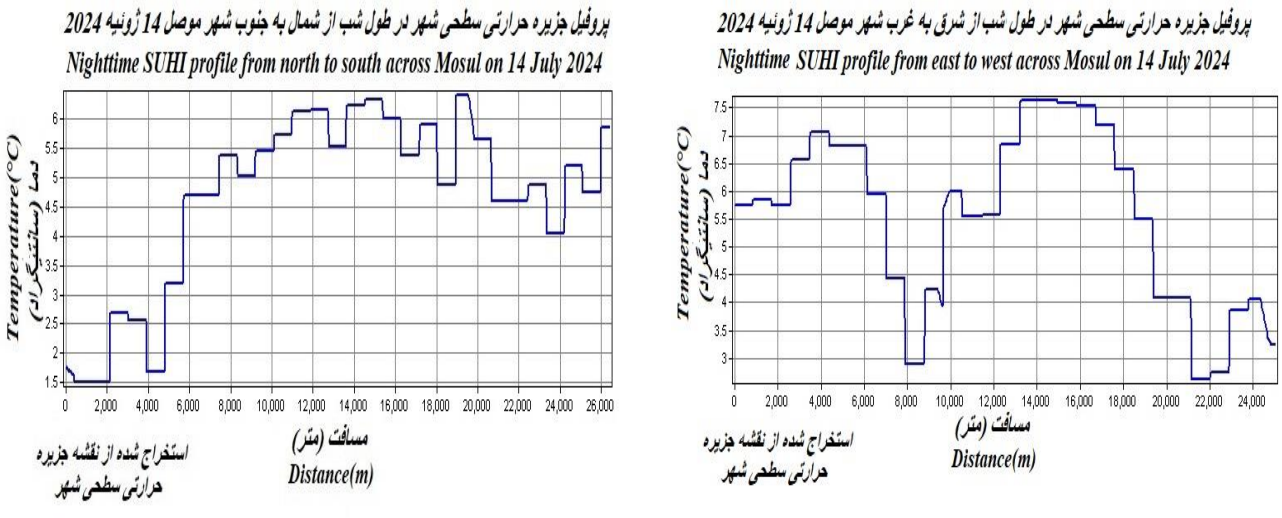
شکل۱۲–پروفیل جزیره حرارتی روزانه در جهات مختلف

Fig. 12. Summer daytime SUHI Profile in Different Directions



شکل ۱۳– شاخص SUHI شبانه تابستان۱۴ژوئیه

Fig. 13. Summer nighttime SUHI index on 14 July



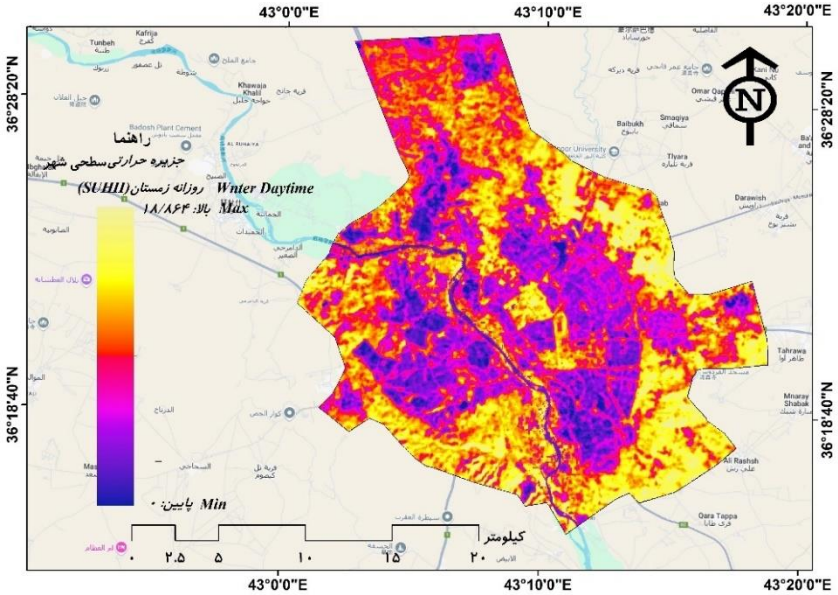
الف-جزیرهٔ حرارتی شبانه از شرق به غرب ۱۴ ژوئیه
a. Nighttime heat island from east to west – July 14

ب-جزیرهٔ حرارتی شبانه از شمال به جنوب ۱۴ ژوئیه
b. Nighttime heat island from north to south – July 14

شکل ۱۴-پروفیل جزیرهٔ حرارتی شبانه در جهات مختلف

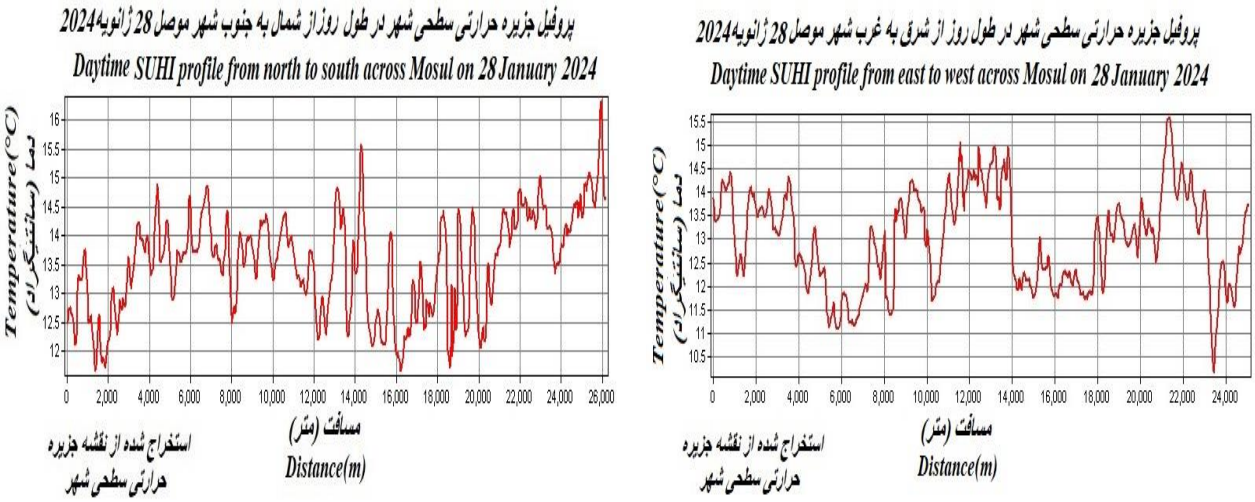
Fig. 14. Summer nighttime SUHI Profile in Different Directions

نقشهٔ شبانهٔ جزیرهٔ حرارتی موصل (۱۴ ژوئیه) نشان‌دهندهٔ تداوم اثرSUHI در مرکز شهر است، جایی که زیرساخت‌ها گرمای روز را ذخیره و شب‌هنگام به‌آرامی آزاد می‌کنند. برخلاف روز، در شب نواحی مرکزی گرم‌تر و نواحی پیرامونی خنک‌تر هستند که ناشی از ویژگی‌های فیزیکی مصالح ساختمانی و نبود پوشش گیاهی در مرکز است. تحلیل پروفیل‌های SUHI در شب ۲۸ ژانویه نیز این روند را تأیید می‌کند و اختلاف دمایی ۲ تا ۵ درجه‌ای میان مرکز و حاشیه را نشان می‌دهد. مسیر شرق- غرب شدت بیشتری در تفاوت دما دارد، در حالی که مسیر شمال- جنوب با وجود عوامل خنک‌کننده، نوسانات کمتری دارد. نتایج نشان می‌دهد که تراکم ساخت‌وساز، نوع کاربری زمین و پوشش سطحی نقش کلیدی در پایداری SUHI شبانه دارند.



شکل ۱۵- شاخص SUHI روزانه زمستان۲۸ ژانویه

Fig. 15. Winter daytime SUHI index on 28 January



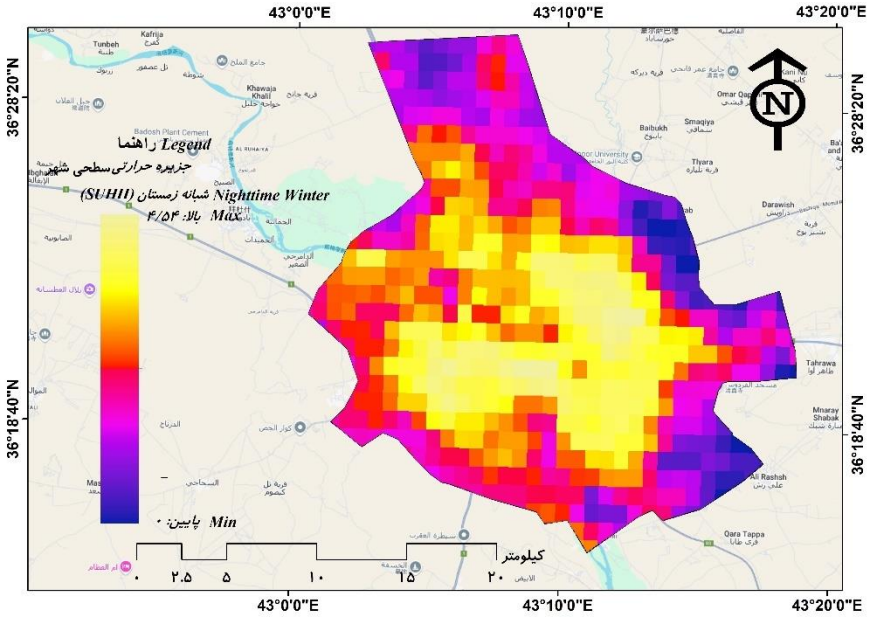
الف-جزیرهٔ حرارتی روزانه از شرق به غرب ۲۸ ژانویه
a. Daily heat island from east to west – January 28

ب-جزیرهٔ حرارتی شمال به جنوب روزانه ۲۸ ژانویه
b. Daily heat island from north to south – January 28

شکل ۱۶-پروفیل جزیرهٔ حرارتی روزانه در جهات مختلف

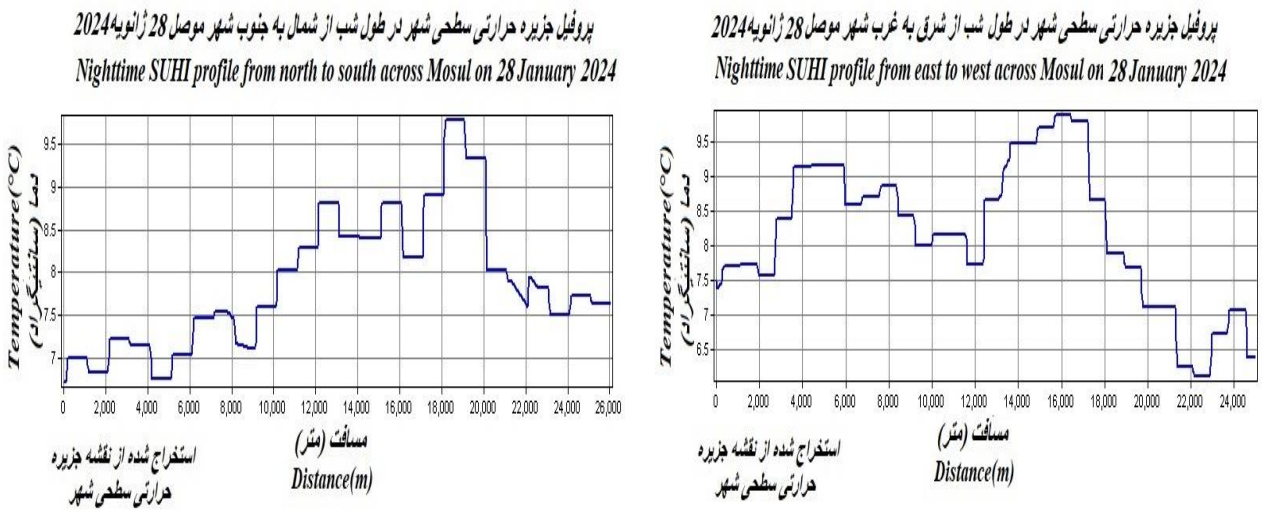
Fig. 16. Winter daytime SUHI Profile in Different Directions

نقشهٔ جزیره حرارت سطحی شهر (SUHI) در روز ۲۸ ژانویه، نشان می‌دهد که برخلاف انتظار، نواحی حاشیه‌ای شهر دمای بالاتری نسبت به مناطق مرکزی دارند. این پدیده ناشی از تابش مستقیم خورشید بر زمین‌های باز، بایر و بدون سایه در حاشیه شهر است، در حالی‌که مناطق مرکزی با سایه‌اندازها، پوشش مرطوب یا مصالح با جذب پایین‌تر، دمای کمتری دارند. این الگوی معکوس SUHI نسبت به تابستان در فصل زمستان رایج است. پروفیل‌های دمایی در دو جهت شرق- غرب و شمال- جنوب نیز این الگو را تأیید کرده‌اند و نشان می‌دهند که حتی در زمین‌های باز داخل شهر نیز دما بالاتر است.



شکل ۱۷- شاخص SUHI شبانه زمستان ۲۵ ژانویه

Fig. 17. Winter nighttime SUHI index on 25 January



الف-جزیرهٔ حرارتی شبانه از شرق به غرب ۲۸ ژانویه
a. Nighttime heat island from east to west – January 28

ب-جزیرهٔ حرارتی شبانه از شمال به جنوب ۲۸ ژانویه
b. Nighttime heat island from north to south – January 28

شکل ۱۸-پروفیل جزیرهٔ حرارتی شبانه در جهات مختلف
Fig. 18. Winter nighttime SUHI Profile in Different Directions

نقشه‌های شبانه جزیرهٔ حرارتی در ۲۸ ژانویه نشان‌دهندهٔ تداوم اثرSUHI هستند؛ به طوری‌که ساختمان‌ها و سطوح سخت مانند آسفالت، گرمای جذب‌شده در روز را شبانه آزاد کرده و باعث افزایش موضعی دما می‌شوند. برخلاف روز که نواحی حاشیه‌ای گرم‌تر بودند، در شب مرکز شهر گرم‌تر است. پروفیل‌های دمایی شمال- جنوب و شرق- غرب نیز این الگو را تأیید می‌کنند. در پروفیل شمال- جنوب، دما از ۵.۵ تا ۹.۵ درجه متغیر است و الگوی نامنظم آن ناشی از جزایر گرمایی محلی و اثر وارونگی دمایی است. در شرق- غرب، مرکز شهر گرم‌تر از حاشیه است که به دلیل انتشار تدریجی گرمای ذخیره‌شده در سطوح سخت شهری می‌باشد. این الگوها اهمیت بررسی دقیق ویژگی‌های فیزیکی سطحی در تحلیل اقلیم میکروشهری را نشان می‌دهند. به طور کلی، در تابستان طی روز، حاشیهٔ شهر به دلیل سطوح خاکی، نبود سایه و پوشش گیاهی ضعیف، گرمای بیشتری نسبت به مرکز متراکم شده دارد. اما در شب، مرکز شهر به دلیل ساختارهای ساختمانی و مصالحی که گرما را ذخیره و آزاد می‌کنند، دمای بالاتری نسبت به حومه دارد. همین الگو در زمستان هم تا حدی دیده می‌شود؛ به‌طوری که روزها حومه، کمی گرم‌تر است، اما شب‌ها مرکز شهر گرمای بیشتری نگه می‌دارد. این تفاوت ناشی از تفاوت در ظرفیت حرارتی، کاربری زمین و الگوی پوشش سطحی مناطق مختلف است. در نتیجه، توزیع دما کاملاً وابسته به زمان و ساختار کالبدی فضاست. این الگوها بیانگر تأثیر تفاوت در کاربری زمین، پوشش گیاهی، و ساختار شهری بر نگه‌داشت و انتشار گرما هستند.

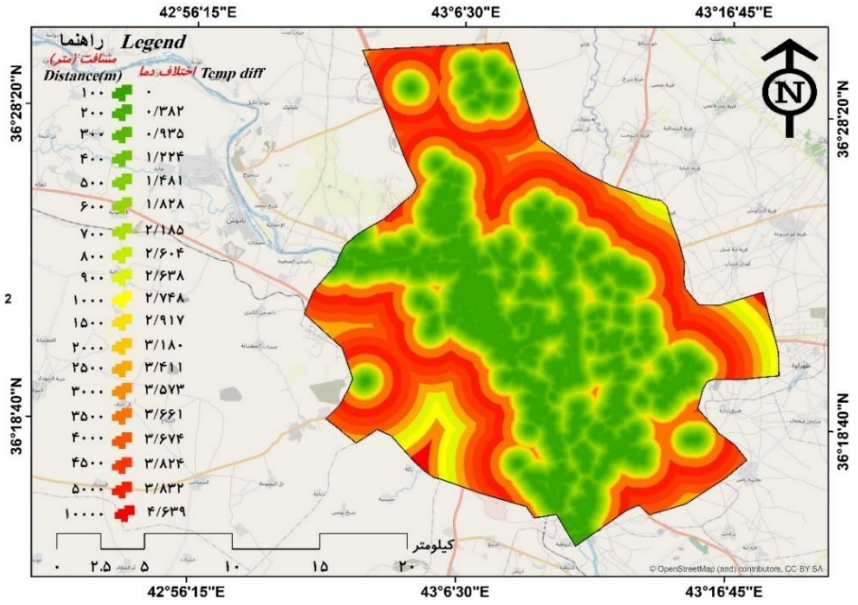
اثر خنک کنندگی لکه‌های سبز(GSCEI)[1]

این شاخص میزان اثر خنک‌کنندگی لکه‌های سبز را روی مناطق اطرافشان بررسی می‌کند. کاهش دما که به آن ظرفیت خنک‌کنندگی[۲] گفته می‌شود، تحت تأثیر میزان پوشش گیاهی و کارایی خنک‌کنندگی آن قرار دارد. البته کارایی خنک‌کنندگی[۳] بسته به عواملی چون اقلیم منطقه‌ای، گونه‌های گیاهی و الگوی فضایی پوشش سبز شهری، بین شهرها تفاوت زیادی دارد. همچنین، میزان بهره‌مندی شهروندان از این مزیت، تحت عنوان سود خنک‌کنندگی[۴] نیز ارزیابی شده و مشخص شده است که ساکنان شهرهای

1- Green Space Cooling Effect Index
2- Cooling Capacity
3- Cooling Efficiency
1- Cooling Benefit

دارای فضای سبز کمتر، به‌ویژه در کشورهای کم‌درآمد، از این اثر کمتر برخوردار هستند. در مجموع، تقویت زیرساخت‌های سبز شهری یکی از مؤثرترین و عادلانه‌ترین روش‌ها برای مقابله با تنش حرارتی در آینده به‌شمار می‌آید (Li et al., 2020) . شکل ۱۹ نقشه اثر خنک‌کنندگی لکه‌های سبز را نشان می‌دهد.

بررسی شاخص اثر خنک‌کنندگی فضای سبز[1] در شهر موصل عراق نشان می‌دهد که فضای سبز به‌صورت معناداری باعث تعدیل دمای سطح زمین در مناطق شهری می‌شود. بر اساس نتایج به دست‌آمده، میانگین دمای سطح فضای سبز (LST_Gr) حدود ۳۳/۴۳ درجه سلسیوس بوده است، در حالی که دمای بافرهای اطراف با افزایش فاصله از فضای سبز روند افزایشی نشان داده‌اند؛ به‌طوری‌که در فاصله ۱۰۰ متری، دمای بافر برابر با فضای سبز بوده و شاخص GSCEI صفر است. اما با افزایش فاصله، GSCEI رشد قابل توجهی یافته و در فواصل بین ۶۰۰ تا ۲۰۰۰ متر به بیشترین میزان خود یعنی بیش از ۳/۸ درجه رسیده است. این افزایش نشان‌دهندهٔ بالاتر بودن دمای محیط اطراف نسبت به فضای سبز است و بیانگر قدرت خنک‌کنندگی فضای سبز در این ناحیه از شهر می‌باشد. نمودار حاصل از این شاخص نیز به‌خوبی این روند را نشان می‌دهد؛ به‌طوری که ابتدا شیب صعودی شدیدی تا حدود ۲۰۰۰ متر مشاهده می‌شود، که نشان‌دهندهٔ افزایش سریع تفاوت دمایی با فاصله گرفتن از فضای سبز است. اما از فاصله ۲۵۰۰ متر به بعد، نمودار وارد فاز نوسانی می‌شود و در حدود ۴۰۰۰ متر افت نسبی در شاخص دیده می‌شود، که می‌توان آن را ناشی از وجود برخی فضاهای نیمه سبز، کاربری‌های باز یا سطوح کمتر متراکم و حتی رودخانه دانست که باعث کاهش دمای موضعی در برخی از بافرها شده‌اند. پس از آن، با افزایش فاصله تا ۱۰ کیلومتر، GSCEI مجدداً افزایش می‌یابد و در نهایت به بیش از ۴/۶ درجه می‌رسد. این مقدار به خوبی بیانگر نقش مؤثر فضای سبز در ایجاد جزایر حرارتی منفی است، به‌ویژه در مناطق پیرامونی که دارای بافت متراکم شهری، آسفالت، ساخت‌وساز و فعالیت انسانی بیشتری هستند. فضای سبز در شهر موصل تأثیر چشم‌گیری در کاهش دما دارد. با افزایش فاصله از لکه‌های سبز، دمای سطح به‌صورت پیوسته افزایش می‌یابد که نشان‌دهندهٔ نقش مهم این لکه‌ها در مقابله با پدیدهٔ جزیرهٔ حرارتی شهری است. بنابراین، این تحلیل ضرورت گنجاندن فضای سبز در هسته‌های شهری و پیرامون آن را به‌عنوان یک سیاست مؤثر در مقابله با تغییر اقلیم شهری و ارتقای کیفیت زیست‌محیطی به‌خوبی روشن می‌سازد.



شکل ۱۹– اثر خنک‌کنندگی فضای سبز (GSCEI)

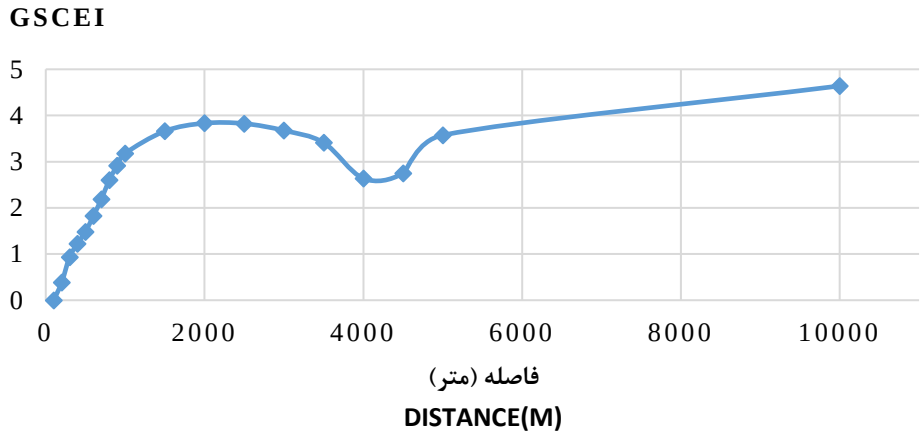
1- Green Space Cooling Effect Index - GSCEI

Fig. 19. Cooling Effect of Green Spaces (GSCEI)

جدول ۶- اثر خنک‌کنندگی فضای سبز در شهر موصل در فواصل مختلف

Table 6-Cooling Effect of Green Spaces in Mosul at Different Distances

GSCEI	میانکین دمای بافر Mean Temperature of Buffer	میانگین دمای فضای سبز Mean Temperature of Green Space	فاصله بافر (متر) Distance(m)
0	21/371532	21/371532	100
-0/277505	21/094027	21/371532	200
0/046549	21/418081	21/371532	300
0/250651	21/622183	21/371532	400
0/494141	21/865673	21/371532	500
0/658854	22/030386	21/371532	600
5/244042	26/615574	21/371532	700
8/04064	29/412172	21/371532	800
7/650324	29/021856	21/371532	900
7/714777	29/086309	21/371532	1000
8/819464	30/190996	21/371532	1500
10/298321	31/669853	21/371532	2000
9/213345	30/584877	21/371532	2500
9/544562	30/916094	21/371532	3000
11/09684	32/468372	21/371532	3500
11/206051	32/577583	21/371532	4000
11/365395	32/736927	21/371532	4500
11/63395	33/005482	21/371532	5000
14/76894	36/140472	21/371532	10000



شکل ۲۰- نمودار اثر خنک‌کنندگی فضای سبز در شهر موصل

Fig. 20. Graph of the Cooling Effect of Green Spaces in Mosul

نتیجه‌گیری

تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق نشان می‌دهند که توزیع لکه‌های سبز شهری و ویژگی‌های بیوفیزیکی سطح به‌طرز قابل‌توجهی بر الگوهای جزایر حرارتی در شهر موصل تأثیرگذار هستند. نتایج به دست آمده از بررسی‌های میدانی و داده‌های تحلیلی در این مطالعه نشان‌دهندهٔ ضرورت مدیریت بهینهٔ فضای سبز و توجه به ویژگی‌های بیوفیزیکی در طراحی شهری می‌باشند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که توزیع ناهمگن لکه‌های سبز شهری منجر به ایجاد الگوهای فضایی ناهمگون جزایر حرارتی شده است. به طور خاص، نواحی با پوشش گیاهی کمتر و سطوح نفوذناپذیر بیشتر، دماهای بالاتری را تجربه می‌کنند.

در این راستا، یافته‌های تحقیق نشان می‌دهند که توزیع ناهمگن لکه‌های سبز باعث ایجاد الگوهای فضایی ناهمگون جزایر حرارتی شده و نواحی با پوشش گیاهی کمتر و سطوح نفوذناپذیر بیشتر دماهای بالاتری را تجربه می‌کنند. این نتایج با پژوهش‌های قبلی مانند سرور شاهی مهر و همکاران (Sarvarshahi Mehr, Alaei Taleghani & Maleki, 2015) و احمدی و همکاران (Ahmadi, Taheri Varki & Eskandari, 2019) همخوانی دارد، که بیان می‌کنند سطوح بازتابنده و پوشش گیاهی تأثیر قابل‌توجهی در کاهش دماهای سطحی دارند. همچنین، تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد که ویژگی‌های بیوفیزیکی، به‌ویژه در نواحی با پوشش گیاهی کمتر، تأثیر زیادی بر افزایش دما و تشدید جزایر حرارتی دارند. نتایج مشابهی در پژوهش‌های هالدر و همکاران (Halder, Bandyopadhyay & Banik, 2021) و لیو و همکاران (Liu, Zhang, Zhang, Zhang & Teng, 2021) نیز مشاهده شده که بر تأثیر فضای سبز بر کاهش شدت جزایر حرارتی تأکید دارند. این توافق بین نتایج مطالعهٔ حاضر و پژوهش‌های خارجی، اهمیت توجه به توزیع مناسب فضای سبز و مدیریت سطوح نفوذناپذیر در کاهش اثرات حرارتی و بهبود کیفیت زندگی ساکنان را نشان می‌دهد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که شاخص NDVI در نواحی با پوشش گیاهی بیشتر به‌طور میانگین ۰/۴۵ و در نواحی با سطوح نفوذناپذیر به ۰/۷۸ کاهش می‌یابد. این رابطه معکوس بین NDVI و دما، که با همبستگی منفی قوی مقدار ۰/۸۳۳- همراه است، به وضوح نشان‌دهندهٔ تأثیر مثبت پوشش گیاهی بر کاهش دماهای سطحی است. این یافته‌ها با مطالعات پیشین مانند امین‌زاده و قشلاق‌پور (Aminzadeh & Gheshlaghipour, 2020) و ثروتی و همکاران (Servati et al., 2021) که به رابطه مستقیم بین پوشش گیاهی و جزایر حرارتی اشاره دارند، همخوانی دارد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان‌دهنده اهمیت بالای توزیع لکه‌های سبز و ویژگی‌های بیوفیزیکی در تأثیرگذاری بر دمای سطح زمین و شکل‌گیری جزایر حرارتی در شهر موصل است. این یافته‌ها می‌توانند مبنای ارائه راهکارهای مدیریتی جهت تعدیل اثرات جزایر حرارتی و بهبود شرایط زیست‌محیطی در شهرها قرار گیرند. پیشنهاد می‌شود که در برنامه‌ریزی‌های شهری، به‌ویژه در شهر موصل، افزایش فضای سبز و مدیریت سطوح نفوذناپذیر به عنوان یک استراتژی کلیدی برای کاهش دما و بهبود کیفیت زندگی ساکنان مورد توجه قرار گیرد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

Addas, A. (2023) .Understanding the Relationship between Urban Biophysical Composition and Land Surface Temperature in a Hot Desert Megacity (Saudi Arabia). *International Journal of Environmental Research and Public Health, 20*(6), 5025. https://doi.org/10.3390/ijerph20065025

Ahmadi, M., Taheri Varki, A., & Eskandari, N. (2019). Monitoring urban heat islands using a fractal-based evolutionary approach (FNEA): Case study of Tehran metropolis. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS, 12*, 95–114. [In Persian] https://doi.org/10.52547/gisj.11.1.93

Almohamad, H., & Alshwesh, I. O. (2023). Evaluation of Index-Based Methods for Impervious Surface Mapping from Landsat-8 to Cities in Dry Climates; A Case Study of Buraydah City, KSA. *Sustainability, 15*(12), 9704. https://doi.org/10.3390/su15129704

Aminzadeh, B., & Gheshlaghipour, S. (2020). Effect of urban green structure spatial patterns on urban heat island mitigation: Case study of Tehran. *Environmental Studies, 46*(2), 239–254. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jes.2021.308065.1008059

Ansari, M., & Norouzi, A. (2022). Spatial autocorrelation of land surface temperature and its relation to land use: Case study of Ahvaz city. *Journal of Geography and Environmental Planning, 34*(3), 143–168. [In Persian] https://gep.ui.ac.ir/article_27325.html?lang=en

Athick, A. M. A., Shankar, K., & Naqvi, H. R. (2019). Data on time series analysis of land surface temperature variation in response to vegetation indices in twelve Wereda of Ethiopia using mono window, split window algorithm and spectral radiance model. *Data in Brief, 27*, 104773. https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104773

Barati, M. J., Farajzadeh Asl, M., & Borna, R. (2022). Analysis of temperature change properties in Tehran using satellite data. *Quarterly Scientific Journal of Rescue and Relief, 14*(1), 10-18. http://dx.doi.org/10.32592/jorar.2022.14.1.2

Bartesaghi Koc, C., & Tschanz, H. (2018) .Impact of Urban Green Spaces on Urban Climate: Lessons from a Global Review. *Urban Climate, 24*, 103-116.

Belgiu, M., & Drăguţ, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 114*, 24-31. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011

Bouhennache, R., Bouden, T., Taleb-Ahmed, A., & Cheddad, A. (2019). A new spectral index for the extraction of built-up land features from Landsat 8 satellite imagery. *Geocarto International, 34*(14), 1531-1551. https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1497094

Bowler, D. E., Buyung-Ali, L. M., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning, 97*(3), 147-155. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006

Dapke, P. P., Nagare, S. M., Quadri, S. A., Bandal, S. B., Gaikwad, R. M., & Baheti, M. R. (2025). Seasonal Analysis of Vegetation, Moisture, Urbanization, and Land Surface Temperature (LST) Using NDVI, NDMI, NDWI, and NDBI Indices: A Case Study of Sillod, Maharashtra. In 2025 International Conference on Computational, Communication and Information Technology (ICCCIT) (pp. 753-760). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICCCIT62592.2025.10928110

Darbani, E. S., Rafieian, M., Parapari, D. M., & Guldmann, J. M. (2023) .Urban design strategies for summer and winter outdoor thermal comfort in arid regions: The case of historical, contemporary and modern urban areas in Mashhad, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 89, 104339. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104339

Das, N., Mondal, P., Sutradhar, S., & Ghosh, R. (2021) .Assessment of variation of land use/land cover and its impact on land surface temperature of Asansol subdivision. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 24*(1), 131-149. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104339

Demisse Negesse, M., Hishe, S., & Getahun, K. (2024) .LULC dynamics and the effects of urban green spaces in cooling and mitigating micro-climate change and urban heat island effects: a case study in Addis Ababa city, Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change, 15*(7), 3033-3055. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.662

Gandomkar, E., & Salehi, K. (2022). Role of home garden tourism development in mitigating urban heat island effects: Case study of Isfahan city. *Geographical Journal of Tourism Space, 11*(42), 121–140. [In Persian] https://journals.iau.ir/article_692397.html

Gislason, P. O., Benediktsson, J. A., & Sveinsson, J. R. (2006). Random forests for land cover classification. *Pattern Recognition Letters, 27*(4), 294-300. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.08.011

Guan, S., & Hu, H. (2025). Exploring the potential relationship between cooling green space and built-up area: Analysis of community green space characteristics based on GWPCA. *Building and Environment, 267*, 112190. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112190

Guha, S., Tiwari, R. K., & Zhang, G. (2024). A multifaceted look at Garhwal Himalayan glaciers: quantifying area change, retreat, and mass balance, and its controlling parameters. *Environment, Development and Sustainability*, 1-24. https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-024-04917-7

Guillevic, P., Göttsche, F., Nickeson, J., Hulley, G., Ghent, D., Yu, Y., ... & Camacho, F. (2018). *Land surface temperature product validation best practice protocol*. Version 1.1. Best practice for satellite-derived land product validation, 60.

Halder, B., Bandyopadhyay, J., & Banik, P. (2021) . Evaluation of the climate change impact on urban heat island based on land surface temperature and geospatial indicators. *International Journal of Environmental Research, 15*, 819-835. https://link.springer.com/article/10.1007/s41742-021-00356-8

Kaimaris, D., & Patias, P. (2016). Identification and Area Measurement of the Built-up Area with the Built-up Index (BUI). Int. J. Adv. Remote Sens. *GIS, 5*(1), 1844-1858. https://technical.cloud-journals.com/index.php/IJARSG/article/view/Tech-627

Kim, J., Khouakhi, A., Corstanje, R., & Johnston, A. S. (2024). Greater local cooling effects of trees across globally distributed urban green spaces. *Science of the Total Environment, 911*, 168494. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168494

Leonardo, H. R. D. A. L., de Almeida, D. N. O., de Amorim, A. R., de Paiva, A. L. R., de Oliveira, L. M. M., & dos Santos, S. M. (2025). Remote sensing applied to biophysical parameters and land cover to identify urban heat

islands in Recife (PE), Brazil. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais, 60*, e2107-e2107. https://doi.org/10.5327/Z2176-94782107

Li, X., Zhou, Y., Zhao, M., & Zhao, X. (2020). A harmonized global nighttime light dataset 1992–2018. *Scientific Data*, *7*(1), 168. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.12312125

Ling, C., Zhang, G., Deng, X., Jiao, A., Chen, C., Li, F., ... & Ling, H. (2022). A study on the drivers of remote sensing ecological index of Aksu Oasis from the perspective of spatial differentiation. *Water*, *14*(24), 4052. https://doi.org/10.3390/w14244052

Liu, J., Wu, J., Yang, Y., Zhang, B., & Yin, L. (2024a) .Exploring the spatiotemporal impacts of urban green space patterns on the core area of urban heat island. *Ecological Indicators*, *166*, 112254. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112254

Liu, J., Zhang, L., Zhang, Q., Zhang, G., & Teng, J. (2021). Predicting the surface urban heat island intensity of future urban green space development using a multi-scenario simulation. *Sustainable Cities and Society*, *66*, 102698. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102698

Liu, Y., Chen, H., Wu, J., Wang, Y., Ni, Z., & Chen, S. (2024b) .Impact of urban spatial dynamics and blue-green infrastructure on urban heat islands: A case study of Guangzhou using Local Climate Zones and predictive modeling. *Sustainable Cities and Society*, *115*, 105819. https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105819

Lu, L., Guo, H., Weng, Q., Bartesaghi-Koc, C., Osmond, P., & Li, Q. (2024) .A transferable approach to assessing green infrastructure types (GITs) and their effects on surface urban heat islands with multi-source geospatial data. *Remote Sensing of Environment*, *306*, 114119. https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114119

Lu, Y., He, T., Xu, X., & Qiao, Z. (2021) .Investigation the robustness of standard classification methods for defining urban heat islands. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *14*, 11386-11394. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3124558

Mahmoudzadeh, H., Naghdbishi, A., & Momeni, S. (2018). The effect of urban land uses on the formation of heat islands (Case study: Mashhad City). *Geography and Environmental Hazards*, *7*(3), 105-119. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.68150

Mohammadi, M., & Afifi, M. A. (2021). Occurrence of urban heat island phenomenon using ASTER satellite imagery: Case study of Shiraz city. *Journal of Geography and Environmental Studies*, *10*(37), 21–44. [In Persian] https://journals.iau.ir/article_679987.html

Moradi, S., & Rezaei Moghaddam, M. H. (2020). Spatio-temporal analysis of the urban heat island in Urmia city using remote sensing and geographic information system. *Geography and Environmental Hazards*, *9*(2), 83-99. https://doi.org/10.22067/geo.v9i2.87137

Rizwan, A. M., & Dennis, L. Y. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, *20*(1), 120-128. https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4

Sarvarshahi Mehr, M., Alaei Taleghani, K., & Maleki, S. (2015). Effect of reflective roofs on reducing urban heat island intensity using satellite imagery: Case study of Kermanshah city. *Urban and Regional Studies and Research*, *7*(25), 101–108. [In Persian]

Servati, Z., Latifi, G., Soltani, A., & Sanaeiyan, H. (2021). Spatial distribution patterns of urban heat islands based on socio-economic characteristics: Case study of Tehran. *Strategic Quarterly of Urban and Regional Development*, *6*(16), 13–23. [In Persian] https://doi.org/10.22054/urdp.2021.62607.1367

Shorabeh, S. N., Kakroodi, A. A., Firozjaei, M. K., Minaei, F., & Homaee, M. (2022). Impact assessment modeling of climatic conditions on spatial-temporal changes in surface biophysical properties driven by urban physical expansion using satellite images. *Sustainable Cities and Society*, *80*, 103757. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103757

Sun, G., Huang, H., Weng, Q., Zhang, A., Jia, X., Ren, J., ... & Chen, X. (2019). Combinational shadow index for building shadow extraction in urban areas from Sentinel-2A MSI imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *78*, 53-65. https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.012

Teimouri, E., Moharrampour, A., & Asghari Zamani, E. (2023). Impact of urban morphology on urban heat island intensity: Case study of Tabriz city. *Geographical Information (Sepehr)*, *33*(126), 184–195. [In Persian] https://doi.org/10.22131/sepehr.2023.540909.2801

Thammaboribal, P., Triapthti, N. K., & Lipiloet, S. (2025). Comparative Analysis of Land Surface Temperature (LST) Retrieved from Landsat Level 1 and Level 2 Data: A Case Study in Pathumthani Province, Thailand. *International Journal of Geoinformatics*, *21*(4), 160-177. https://doi.org/10.52939/ijg.v21i4.4089

U.S. Geological Survey. (2021). *Landsat Collection 2 Level-2 science products—Surface temperature product guide*. https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products

WeatherSpark. (n.d.). Average weather in Mosul, Iraq, year round. Retrieved May 14, 2025, from https://weatherspark.com/y/102754/Average-Weather-in-Mosul-Iraq-Year-Round

Wesley, E. J., & Brunsell, N. A. (2019). Greenspace pattern and the surface urban heat island: A biophysically-based approach to investigating the effects of urban landscape configuration. *Remote Sensing*, *11*(19), 2322. https://doi.org/10.3390/rs11192322

Wu, Z., Zhou, Y., & Ren, Y. (2024) .Green space-building integration for Urban Heat Island mitigation: Insights from Beijing's fifth ring road district. *Sustainable Cities and Society*, *116*, 105917. https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105917

Xiao, X. D., Dong, L., Yan, H., Yang, N., & Xiong, Y. (2018). The influence of the spatial characteristics of urban green space on the urban heat island effect in Suzhou Industrial Park. *Sustainable Cities and Society*, *40*, 428-439. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.002

Xiong, Q., Chen, W., He, L., Luo, S., & Li, H. (2023). Study on the influencing factors and the spatiotemporal heterogeneity of Urban Heat Island effect in Nanchang City of China. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, *22*(3), 1444-1457. https://doi.org/10.1080/13467581.2022.2085723

Xu, C., Chen, G., Huang, Q., Su, M., Rong, Q., Yue, W., & Haase, D. (2022). Can improving the spatial equity of urban green space mitigate the effect of urban heat islands? An empirical study. *Science of The Total Environment*, *841*, 156687. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156687

Yaghoobi, M., Vafaeenejad, A., Moradi, H., & Hashemi, H. (2022). Analysis of landscape composition and configuration based on LULC change modeling. *Sustainability*, *14*(20), 13070. https://doi.org/10.3390/su142013070

Yu, H., Yang, Q., Jiang, S., Zhan, B., & Zhan, C. (2024a). Detection and attribution of vegetation dynamics in the yellow river basin based on long-Term kernel NDVI data. *Remote Sensing*, *16*(7), 1280. https://doi.org/10.3390/rs16071280

Yu, H., Zhu, D., Wan, S., Jiang, Y., Lu, C., Zhang, R., & Jia, Y. (2024b). Detecting polder water surface dynamics using multi-source remote sensing data. *Proceedings*, *110*(1), 19. https://doi.org/10.3390/proceedings2024110019

Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, *24*(3), 583-594. https://doi.org/10.1080/01431160304987

Zhang, X., Meng, C., Gou, P., Huang, Y., Ma, Y., Ma, W., & … Hu, Z. (2024) .Evaluating the reconstructed all-weather land surface temperature for urban heat island analysis. *Remote Sensing*, *16*(2), 373. https://doi.org/10.3390/rs16020373

Vol. 15, No. 1, Spring 2026, p. 226-250 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.95982.1616 OPEN ACCESS

Application of Machine Learning Algorithms in Flood Risk Management with Emphasis on Tourist- Oriented Rural Settlements (Case Study: the Bisotun Tourist Sample Area, Kermanshah Province)

Farhad Javan[1], Davood Jamini[2]*, Ramin Atashbahar[3]

[1] Department of Tourism Management, Faculty of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

[2] Department of Geomorphology, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran (Part-time Researcher at Kurdistan Studies Institute, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran)

[3] Department of Remote Sensing and Geographic Information Systems, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 15 October 2025

Revised: 30 November 2025

Accepted: 02 December 2025

Available Online:

03 December 2025

Keywords:

Flood Risk Management

Machine Learning

Random Forest (RF)

Decision Tree (DT)

Tourist-Oriented Settlements

ABSTRACT

Given the presence of tourists in tourist-oriented areas, the occurrence of environmental hazards in such areas can result in greater environmental, human, and economic damages and losses compared to other regions. Therefore, the aim of the present applied study is to delineate flood risk zones and identify villages exposed to flood hazards. This research was conducted as a case study in the Bisotun Tourist Sample Area, encompassing 60 villages. To achieve the main objective of the study, 13 criteria and two machine learning algorithms Classification and Regression Tree (CART) and Simple Random Forest (Simple RF) were employed. The results of the CART algorithm indicated that 39.5% of the study area and 80% of the villages are located within high and very high flood-risk zones. The results of the Simple RF algorithm showed that 36.1% of the area and 75% of the villages fall within high and very high flood risk zones. A comparison of the flood risk zoning maps reveals a high degree of similarity between the results; however, the CART algorithm demonstrated a relatively more stringent performance in identifying high-risk areas. The model validation results indicate that despite the high accuracy of both algorithms, the Simple RF algorithm achieved higher accuracy, with an AUC value of 0.985, compared to the CART algorithm with an AUC value of 0.942. Overall, the results of the study indicate that most tourist-oriented villages are located within high-risk flood zones.

* Corresponding author: Davood Jamini E-mail address: D.Jamini@uok.ac.ir

How to cite this article: Javan, F., Jamini, D., & Atashbahar, R. (2026). Application of Machine Learning Algorithms in Flood Risk Management with Emphasis on Tourist- Oriented Rural Settlements (Case Study: the Bisotun Tourist Sample Area, Kermanshah Province). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 15*(1), 226-250. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.95982.1616

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

A review of the relevant literature indicates that artificial intelligence (AI) was first introduced by John McCarthy in 1955 as "the science and engineering of making intelligent machines." Artificial intelligence generally refers to technologies derived from human cognitive processes that are implemented through computer systems. The expansion of intelligence as a theoretical concept emerged alongside efforts to simplify logical problem solving in computer science. In its early stages, artificial intelligence primarily supported theoretical reasoning and was mainly applied to solving complex mathematical problems. To date, no single comprehensive definition of artificial intelligence has been universally accepted, and various interpretations have been proposed. Most definitions conceptualize AI either as a subfield of computer science or in terms of machines' ability to imitate human intelligence. Given its close association with the rapid development of computer technology, some researchers define artificial intelligence as "the scientific study of computational principles rooted in intelligent human thinking and behavior." In general, artificial intelligence is regarded as a branch of advanced technologies capable of identifying, analyzing, and learning from the characteristics of human intelligence, thereby exhibiting intelligent behavior. One of the key applications of artificial intelligence in tourism development is the use of machine learning algorithms, which are increasingly employed to address tourists' needs, such as multilingual communication and responses to complex inquiries. Tourism destinations particularly rural tourism sample areas face a variety of challenges, and machine learning techniques provide effective tools for managing these challenges. Among the most critical challenges confronting rural tourism areas is the occurrence of environmental hazards, especially floods, which can result in multidimensional consequences, including human, economic, environmental, and psychological impacts on tourists and local communities.

Material and Methods

The present study was conducted with the general objective of applying artificial intelligence in environmental risk management, with particular emphasis on flood risk in the Bisotun Tourist Sample Area. Given the complex and multi-causal nature of flood events, an integrated framework combining field surveys, Geographic Information Systems (GIS), remote sensing data, and machine learning algorithms was adopted.

The integration of diverse spatial datasets with powerful decision-making models—specifically the Classification and Regression Tree (CART) and Simple Random Forest (Simple RF) algorithms—enabled accurate identification of flood-prone areas and analysis of the factors influencing flood occurrence. Overall, the research was carried out in seven main stages:

1. Literature review and research background
   Previous national and international studies were reviewed to improve understanding of flood mechanisms and contributing factors.
2. Selection and definition of effective parameters
   Based on literature review and expert opinions from the fields of geography, natural resources, environmental sciences, remote sensing, and crisis management, 13 key variables were selected as model inputs.
3. Flood occurrence data preparation and sampling
   Sentinel-1 radar imagery was used to generate flood occurrence point data, covering three critical periods: before, during, and after the 2019 flood event.
4. Data processing and spatial layer generation
   Spatial datasets were collected and processed from multiple sources.
5. Implementation of machine learning models
   The CART and Simple Random Forest algorithms were applied to model flood susceptibility.
6. Model performance evaluation

Model performance was assessed using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve and the Area Under the Curve (AUC).

7. Final map production and zoning analysis
   Flood risk maps generated by the CART and Simple RF models were classified and integrated in the ArcGIS Pro environment.

Results and Discussion

The results of the CART algorithm indicated that 39.5% of the total study area and 80% of the 60 investigated villages are located within high and very high flood risk zones. Similarly, the Simple RF algorithm classified 36.1% of the study area and 75% of the villages as belonging to high and very high flood risk zones. Comparison of the flood risk zoning maps revealed a high degree of spatial similarity between the two models. However, the CART algorithm exhibited a relatively more stringent performance in identifying high risk areas. Model validation results showed that despite the high accuracy of both algorithms, the Simple RF model achieved superior predictive performance, with an AUC value of 0.985, compared to 0.942 for the CART model.

Conclusion

Overall, the outputs of machine learning algorithms demonstrate a high level of reliability in environmental risk management. In the context of flood risk management in the Bisotun Tourist Sample Area and its rural settlements, the main practical recommendations include: strict enforcement of construction regulations in flood-prone areas; equipping rural settlements with modern flood early-warning systems; ensuring timely and accurate flood forecasts by the Meteorological Organization; construction and development of flood diversion channels; use of durable and resilient materials in residential, public, and transportation infrastructure; dissemination of flood risk zoning maps among rural managers; establishment of relief and rescue centers near high-risk villages; education of local communities on flood preparedness and response; and installation of warning signs in hazardous zones to inform both residents and tourists.

جلد ۱۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۲۵۰-۲۲۶ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.95982.1616 دسترسی آزاد

کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در مدیریت خطر سیلاب با تأکید بر سکونتگاه‌های روستایی گردشگرپذیر (مطالعهٔ موردی: منطقهٔ نمونه گردشگری بیستون، استان کرمانشاه)

فرهاد جوان [۱]، داود جمینی [۲*]، رامین آتش‌بهار [۳]

[۱] گروه مدیریت جهانگردی، دانشکدهٔ میراث فرهنگی، صنایع‌دستی و گردشگری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

[۲] گروه ژئومورفولوژی، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران (پژوهشگر پاره وقت پژوهشکدهٔ کردستان‌شناسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران)

[۳] گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱

کلمات کلیدی:

مدیریت خطر سیلاب

یادگیری ماشین

جنگل تصادفی

درخت تصمیم

سکونتگاه‌های گردشگرپذیر

چکیده

با توجه به حضور گردشگران در فضاهای گردشگرپذیر، وقوع مخاطرات محیطی در این فضاها می‌تواند نسبت به دیگر مناطق، آسیب‌ها و خسارات زیست‌محیطی، جانی و مالی بیشتری را به همراه داشته باشد. از این‌رو هدف پژوهش کاربردی حاضر، پهنه‌بندی خطر سیل و شناسایی روستاهای در معرض خطر سیل است که به صورت مطالعهٔ موردی در منطقهٔ نمونه گردشگری بیستون (شامل ۶۰ روستا) انجام گرفته است. در راستای دستیابی به هدف اصلی پژوهش از ۱۳ معیار و دو الگوریتم Cart و Simple RF استفاده شده است. نتایج الگوریتم Cart نشان داد ۳۹/۵ درصد از مساحت و ۸۰ درصد از روستاها، در پهنه‌های خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته است. نتایج الگوریتم Simple RF نشان داد ۳۶/۱ درصد از مساحت و ۷۵ درصد از روستاها در پهنه‌های خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته‌اند. مقایسه پهنه‌بندی‌ها نشانگر شباهت زیاد نتایج آن‌ها است با این تفاوت که الگوریتم Cart در شناسایی محدوده‌های پر خطر تاحدی سختگیرانه‌تر عمل کرده است. با این تفاوت که الگوریتم Cart در شناسایی محدوده‌های پر خطر تا حدی سختگیرانه‌تر عمل کرده است. نتایج صحت‌سنجی عملکرد الگوریتم‌ها نشان داد علی‌رغم دقت بالای دو الگوریتم، الگوریتم Simple RF، با AUC معادل ۰/۹۸۵، دقت بیشتری را نسبت به الگوریتم Cart (با AUC معادل ۰/۹۴۲) داشته است. نتایج کلی پژوهش، نشانگر استقرار اکثر روستاهای گردشگرپذیر در پهنه‌های پر خطر است.

* نویسندهٔ مسئول: داود جمینی

E-mail: D.Jamini@uok.ac.ir

مقدمه

امروزه یکی از دگرگون‌کننده‌ترین نوآوری‌ها در حوزۀ فناوری، ابزارهای هوش مصنوعی[1] است. ابزارهای هوش مصنوعی با توانایی پردازش حجم وسیعی از داده‌ها، تجزیه و تحلیل الگوها و ارائه بینش‌های هوشمند (Alyasiri et al., 2024) در حوزه‌های مختلف کاربردهای متعددی دارند و می‌توانند نقش کلیدی را در تدوین برنامه‌ریزی یکپارچه ایفا نماید (Solakis, Katsoni, Mahmoud & Grigoriou, 2024). ارتقای وضعیت و ابعاد مختلف هوش مصنوعی در سال‌های اخیر منجر به شکل‌گیری روش‌های مختلفی شده است تا در کنار بسیاری از اهداف دیگر، بتوان داده‌ها را به ترتیب استخراج و تجزیه و تحلیل کرد و به بهترین شیوه، یک هدف ایده‌آل را انتخاب نمود (Lacárcel, 2022).

بر اساس تقسیم‌بندی‌های صورت گرفته، هوش مصنوعی به هفت زیر شاخه شامل بازنمایی دانش، استدلال، برنامه‌ریزی، تصمیم‌گیری، بهینه‌سازی، یادگیری ماشین و الگوریتم‌های فراابتکاری[2] تقسیم می‌شود. با این تفاسیر، هوش مصنوعی بسته به قابلیت‌های مختلف زیرشاخه‌های خود، می‌تواند اشکال و عملکردهای متفاوتی داشته باشد (Lv, Shi & Gursoy, 2022). در این میان یکی از ابزارهای پرکاربرد هوش مصنوعی در راستای ارائه خدمات به جامعه بشری در زمینه‌های مختلف، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین است (Solakis et al., 2024). با استفاده از قدرت الگوریتم‌های یادگیری ماشین، سازمان‌ها می‌توانند پیش‌بینی‌ها و پیش‌بینی‌های دقیق‌تری انجام دهند و آنها را قادر می‌سازد تا روندهای آینده، الگوهای تقاضا و نوسانات بازار را پیش‌بینی کنند، بنابراین تصمیم‌گیری آگاهانه و برنامه‌ریزی استراتژیک را تسهیل می‌کنند (García-Madurga & Grilló-Méndez, 2023). یکی از مهم‌ترین کاربردهای الگوریتم‌های یادگیری ماشین، استفاده از آن‌ها برای شناسایی نواحی مستعد مخاطرات محیطی است (Zhang et al., 2025).

در سطح جهانی، مخاطرات طبیعی قدرتمندترین و اغلب غیرقابل پیش‌بینی‌ترین رویدادها هستند که باعث ویرانی‌های گسترده می‌شوند. مخاطرات طبیعی مانند سیل، زلزله، فوران‌های آتشفشانی، رانش زمین و سونامی تهدیدات قابل توجهی برای زندگی، زیرساخت‌ها و معیشت انسان هستند (Chaudhary, Shah, Shakya & Aryal, 2024). در میان این مخاطرات، سیل یکی از فاجعه‌بارترین بلایایی است که جوامع انسانی با آن مواجه هستند و میلیون‌ها نفر را تحت تأثیر قرار می‌دهد و به اقتصادها به شکلی جبران‌ناپذیر آسیب می‌رساند (Peiris, 2024). سیل به عنوان یک بلای طبیعی جدی، مکرراً در سراسر جهان رخ می‌دهد. در دهه‌های اخیر، سیل‌ها به دلیل تغییرات اقلیمی و گسترش شهرنشینی تشدید شده‌اند. زندگی مردم و توسعۀ اجتماعی به طور جدی توسط سیل تهدید شده است (Chen, Yao, Wang & Du, 2019) و در مجموع می‌تواند برای محیط طبیعی و جامعۀ انسانی ساکن در مناطق مختلف چالش‌های چندبعدی متعددی را به همراه داشته باشد (Shabani Hosainabadi & Jamini, 2025). سیل در ایران، یکی از سه بلایای طبیعی و اصلی است (Rahimi & Nastaran, 2025) که طی سال‌های اخیر به دلایل مختلف انسانی و طبیعی، شاهد افزایش وقوع آن بوده‌ایم (Ahmadzadeh & Davarpanah, 2023) که همراه با خسارات انسانی و اقتصادی عمده‌ای نظیر آسیب به زیرساخت‌ها، کاهش بازده محصولات کشاورزی، تخریب منازل مسکونی، شیوع بیماری بوده است (Herischian & Mahmoudzadeh, 2025).

یک رویکرد رایج برای شروع برنامه‌ریزی برای اقدامات کنترل سیل، تهیه نقشه‌های طغیان سیل با استفاده از مدل‌سازی مکانی است (Chaudhary et al., 2024). در میان مدل‌سازی‌هایی (از جمله مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، مدل‌سازی عددی سیل، مدل‌سازی بارش ـ رواناب، مدل‌سازی سیل مبتنی بر سنجش از دور و GIS، مدیریت سیل مبتنی بر تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره و مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین) که نقش کلیدی را در مطالعات ارزیابی خطر سیل ایفا می‌نمایند، رویکردهای مبتنی بر GIS و یادگیری ماشین نسبت به دیگر مدل‌سازی‌ها ترجیح داده می‌شوند (Zhang et al., 2025). روش‌های یادگیری ماشین

1- Artificial Intelligence
2- knowledge representation, reasoning, planning, decision-making, optimization, machine learning and metaheuristic algorithms

به طور خودکار روابطی بین عوامل مؤثر بر سیل و مکان‌های سیل‌زده یا غیر سیل‌زده را برقرار می‌کنند و امکان پیش‌بینی حساسیت به سیل در مکان‌هایی که تاکنون به عنوان مناطق سیل‌خیز شناسایی نشده‌اند را فراهم می‌کنند (Ruan, Sun, Yu, Shou & Wang, 2025).

بررسی‌ها نشان می‌دهد به لحاظ مخاطرات محیطی از جمله سیل، مناطق روستایی در مقایسه با مناطق شهری از شدت آسیب‌پذیری بالاتری برخوردار هستند به همین دلیل ارزیابی آسیب‌پذیری در استراتژی‌ها و شیوه‌های برنامه‌ریزی روستایی اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده است (Ecemiş Kılıç, Efe Güney, Ayhan Selçuk, Alğın Demir & Gür, 2025). همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد پهنه‌بندی مخاطرات محیطی در مقاصد گردشگری روستایی از اهمیت دوچندان برخوردار است. چراکه علاوه بر جامعهٔ محلی، گردشگران زیادی در این فضاهای تردد دارند که با مخاطرات منطقه، آشنایی زیادی ندارند و همواره در معرض خطر هستند. بنابراین پهنه‌بندی خطر در مقاصد گردشگری، از اهمیت استراتژیک برخوردار است (Javan, Atashbahar & Motalebpoor, 2025).

مرور ادبیات مرتبط با موضوع مورد مطالعه نشان می‌دهد هوش مصنوعی برای اولین بار توسط جان مک کولاخ در سال ۱۹۵۵ به عنوان "علم و مهندسی برای ساخت ماشین های هوشمند" پیشنهاد شد. معمولاً هوش مصنوعی به فناوری برگرفته از هوش انسانی اطلاق می‌شود که توسط برنامه‌های رایانه‌ای معمولی تحقق می‌یابد (Tsaih & Hsu, 2018). ایده بسط تعریف هوش به عنوان یک مفهوم نظری در طول ساده سازی حل منطقی مسئله در علوم کامپیوتر ظهور کرد. در ابتدا، هوش مصنوعی به عنوان کمکی برای تفکر نظری بود که عمدتاً برای حل مسائل پیچیده و دشوار ریاضی استفاده می‌شد (Zsarnoczky, 2017)

تاکنون یک تعریف جامع از هوش مصنوعی ارائه نشده است و در ارتباط با مفهوم آن تعاریف متعددی ارائه شده است. بیشتر تعاریف هوش مصنوعی بر روی آن به عنوان زیر شاخه‌ای از علوم کامپیوتر یا از نظر نحوه تقلید ماشین‌ها از هوش مصنوعی تمرکز دارد. از آنجایی که ظهور فناوری هوش مصنوعی از توسعه سریع فناوری رایانه‌ای جدایی ناپذیر است، برخی از محققان تمایل دارند آن را از منظر علم رایانه تعریف کنند و بر این باورند که هوش مصنوعی "مطالعه علمی اصول محاسباتی است که ریشه در شیوه تفکر و رفتار هوشمند انسانی دارد" (Tuo, Ning & Zhu, 2021). به طور کلی، هوش مصنوعی به عنوان زیرشاخه‌ای از «خانواده فناوری‌ها» شناخته می‌شود که می‌تواند ویژگی‌های هوش انسانی را شناسایی و تجزیه و تحلیل نماید و بر اساس یادگیری صورت گرفته، شکل پیشرفته‌ای از هوش انسانی را به نمایش بگذارد (Kong, Wang, Qiu, Cheung & Bu, 2023). همانطور که عنوان گردید یکی از ابزارها مهم و کلیدی هوش مصنوعی در توسعه صنعت گردشگری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین است که در زمینه‌هایی مانند پاسخگویی به نیازهای گردشگران با زبان‌های مختلف و پاسخگویی به سوالات پیچیده آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Irawan, 2023). با توجه به اینکه مقاصد گردشگری از جمله مناطق نمونه گردشگری به نواحی روستایی با چالش‌های مختلفی مواجه هستند، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند ابزار مناسبی برای مدیریت این چالش‌ها باشد (Jamini, Javan & Atashbahar, 2025; Jamini, Komasi, Yazdi, Hanne & Coluccio, 2025). یکی از مهم‌ترین چالش‌های مناطق نمونه گردشگری روستایی وقوع مخاطرات محیطی از جمله سیل در این مقاصد گردشگری است که می‌تواند پیامدهای چند بعدی جانی، مالی، زیست محیطی و روانی را برای گردشگران و جامعهٔ محلی به همراه داشته باشد (Javan et al., 2025). با توجه به اهمیت پهنه‌بندی خطر در فضاهای مختلف جغرافیایی مطالعات مختلفی در خصوص آن صورت گرفته است که در ادامه به نتایج چند مطالعه مهم اشاره شده است.

کیم و نیومن (Kim & Newman, 2019) و چن و همکاران (Chen et al., 2019) در خصوص پهنه‌بندی خطر سیل در فضاهای مختلف شهری در کشورهای هلند، آمریکا و چین به این نتیجه رسیده‌اند که مناطق مختلف در برابر این مخاطره در شرایط گوناگونی قرار دارند و با توجه به اثرات نامطلوب سیل بر محیط طبیعی و انسانی، مدیریت این مخاطره، ضروری است و نیاز است از روش‌ها و ابزارهای جدید برای پهنه‌بندی مناطق مختلف در برابر مخاطرات محیطی استفاده شود.

نتایج پژوهش چودری و همکاران (Chaudhary et al., 2024) با هدف پهنه‌بندی خطر سیل در حوزه آبخیز دره کاتماندو در کشور نپال با استفاده از رویکرد فرآیند سلسله مراتبی تحلیلی (AHP) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و ۱۰ معیار (بارندگی، ارتفاع، شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، انحنای زمین، کاربری/ پوشش زمین، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، زمین‌شناسی و خاک) نشان داد حدود ۸۰ درصد محدودهٔ مورد بررسی دارای حساسیت به سیل متوسط تا کم است و در مجموع به استثنای بخش محدودی از خط ساحلی محدوده مورد مطالعه خطر سیل چندان زیادی در این فضای جغرافیایی وجود ندارد.

صادقی و جوان (Sadeghi & Javan, 2024) در مطالعه‌ای اقدام به ارزیابی روستاهای گردشگری ایران (۹۸۰ روستا) از لحاظ آسیب‌پذیری ژئوفیزیکی با استفاده از سناریوهای فازی و معیارهای فاصله از (گسل‌های فعال، دشت‌های سیلابی، نقاط زمین‌لغزش و مناطق حفاظت‌شده)، بافت و دانه‌بندی خاک، شیب زمین و سازندهای زمین‌شناسی نموده‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد در ایران روستاهای گردشگری زیادی در معرض خطرات ژئوفیزیکی قرار دارند. به این صورت که در سناریوهای بدبینانه، متعادل و خوش‌بینانه به‌ترتیب ۷۳/۱ درصد، ۳۶/۷ درصد، ۱۴/۳۸ درصد از نقاط روستایی در معرض خطر قابل توجهی قرار دارند. نتایج پژوهش ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2024) در خصوص ارزیابی خطر سیل در شرق کشور با رویکرد یادگیری ماشین و استفاده از عوامل جغرافیایی (شامل هشت عنصر ارتفاع، شیب، میانگین بارندگی سالانه، داده‌های پوشش زمین، شاخص توان جریان، شاخص انتقال رسوب، شاخص رطوبت توپوگرافی و شاخص کنترل توپوگرافی)، پوشش گیاهی (شامل شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده رودخانه (شامل فاصله تا رودخانه) و زیرسطحی (شامل تراکم شبکه‌های خطوط لوله و نسبت سطح نفوذناپذیر)، به این نتیجه رسیده‌اند که ارتفاع و بارندگی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع سیل هستند و در میان چهار ناحیه مورد بررسی حداقل ۸ درصد و حداکثر ۳۳ درصد از محدودهٔ مورد مطالعه در کلاس‌های خطر زیاد و بسیار زیاد قرار دارد.

نتایج پژوهش شعبانی حسین آبادی و جمینی (Shabani Hosainabadi & Jamini, 2025) با هدف پهنه‌بندی منظر فرهنگی هورامان به لحاظ مخاطره سیل با استفاده ۱۲ معیار (شیب، بارش، تفرق پوشش گیاهی، تراکم رودخانه، شاخص موقعیت توپوگرافی، رواناب، شاخص قدرت جریان، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی، زمین شناسی، ارتفاع و خاک) و رویکرد همپوشانی فازی نشان داد ۳۴/۴۶ درصد از مساحت مورد بررسی در پهنه‌های خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته است و در میان ۳۱۹ روستای مورد مطالعه، ۲۸۲ روستا (معادل ۸۸/۴ درصد از کل روستاها) در پهنه‌های خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته‌اند.

اسدی و همکاران (Asadi, Shayestefar & Ganjaeian, 2026) در مطالعه‌ای با هدف کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت مخاطرات زیست‌محیطی نظیر سیلاب، زمین‌لغزش، تغییرات پوشش‌گیاهی، آتش‌سوزی‌ها و مدل‌سازی مسیر آلاینده‌ها در آبخوان‌ها در اکوسیستم‌های کوهستانی نشان دادند که ادغام داده‌های چندمنبعی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی توانسته است پیش‌بینی‌هایی دقیق‌تر و سریع‌تر نسبت به روش‌های سنتی در خصوص در مدیریت مخاطرات زیست‌محیطی ارائه دهد. این قابلیت نه تنها موجب افزایش زمان واکنش و امکان صدور هشدارهای زودهنگام شده، بلکه زمینه‌ساز برنامه‌ریزی پیشگیرانه و کاهش خسارات جانی و مالی نیز شده است. نتایج پژوهش جوان و همکاران (Javan et al., 2025) با هدف پهنه‌بندی مخاطرات محیطی (خطر وقوع سیل) در مقاصد گردشگری در شهرستان سروآباد واقع در استان کردستان نشان داد از کل مساحت مورد بررسی (۱۰۴۴ کیلومتر مربع)، تنها ۱/۹۶ درصد در پهنه خطر زیاد و بسیار زیاد قرار دارد. همچنین نتایج صحت‌سنجی مدل نهایی پژوهش با استفاده از نمودار Omission و Predicted Area و منحنیROC نشان داد مدل نهایی از دقت و عملکرد بالایی برخوردار بوده است و به خوبی توانسته است شهرستان سروآباد را به لحاظ وقوع سیلاب پهنه‌بندی نماید. صادقی و حاصلی (Sadeghi & Haseli, 2025) در مطالعه‌ای در خصوص ارزیابی آسیب‌پذیری مقاصد گردشگری روستایی در برابر مخاطره سیل در استان چهارمحال و بختیاری از شش معیار ارتفاع، شیب، زمین‌شناسی، پوشش اراضی، آبراهه، بارش و دو عملگر همپوشانی فازی OR و AND استفاده کرده‌اند. نتایج این مطالعه بر اساس سناریو بدبینانه نشان داد حدود ۹۸/۶ درصد از محدوه مورد مطالعه و ۱۴ روستا از ۱۸ روستای مقصد گردشگری، در پهنه پرخطر قرار گرفته‌اند. نتایج پژوهش گنجائیان و همکاران (Ganjaeian, Nosrati, Ebrahimi & Ghisarian, 2025) در خصوص ارزیابی

وضعیت آسیب‌پذیری روستاهای منطقهٔ اورامان در برابر مخاطرات طبیعی (سه مخاطره زمین لغزش، زمین لرزه و سیلاب) با استفاده از رویکرد ترکیبی AHP-Fuzzy و معیارهای شیب، جهت شیب، ارتفاع، لیتولوژی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده و کاربری اراضی نشان داد منطقهٔ اورامان دارای پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی در برابر مخاطرات طبیعی است و در این محدودهٔ جغرافیایی، بخش مرکزی منطقه اورامان از جمله روستاهای برقرو، نی‌آباد، دگاگاه، ماضی‌بن، نسل و بوری‌در، دارای پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی هستند.

صادقی و جوان (Sadeghi & Javan, 2025) در مطالعه‌ای با هدف بررسی آسیب‌پذیری روستاهای گردشگری ایران از لحاظ مخاطره زمین لغزش با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و نه معیار شیب، ارتفاع، فرسایش، جنس خاک، نوع کاربری اراضی، بارش، فاصله از گسل، جاده و آبراهه، به این نتیجه رسیدند که ۶/۸ درصد مساحت کشور و ۱۴ درصد از روستاهای گردشگری ایران (۱۳۸ روستا از ۹۸۰ روستای مورد بررسی) در پهنه‌های با آسیب‌پذیری بسیار بالا و بالا قرار گرفته‌اند.

مرور ادبیات و سوابق پژوهش نشان می‌دهد مطالعات متعددی در خصوص پهنه‌بندی خطر سیل در مناطق مختلف انجام گرفته با این وجود در خصوص شناسایی روستاهای در معرض خطر سیل و به ویژه در مناطق گردشگری مطالعات اندکی انجام گرفته است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد در خصوص پهنه‌بندی مناطق گردشگری در معرض خطر سیل و به ویژه سکونتگاه‌های روستایی استقراریافته در این مناطق با استفاده از زیربخش‌های هوش مصنوعی علی‌خصوص الگوریتم‌های یادگیری ماشین، خلأ مطالعاتی شدیدی وجود دارد. از این‌رو مطالعات حاضر به لحاظ موضوع و ابزار مورد استفاده تا حد زیادی دارای نوآوری است و می‌تواند مبنایی برای مطالعات در خصوص موضوع مورد بررسی در آینده باشد.

منطقهٔ نمونه گردشگری بیستون یکی از مهم‌ترین مناطق نمونه گردشگری استان کرمانشاه است که در شهرستان هرسین قرار گرفته است. این منطقه، به واسطه برخورداری از جاذبه‌های طبیعی (کوه بیستون، رودخانه‌های سطحی، چشم‌اندازهای طبیعی بکر و زیبا، آب‌و هوای معتدل و ...) و انسانی (سنگ‌نوشته و آثار تاریخی پیرامون کوه بیستون، برگزاری جشنواره‌های محیطی، بافت روستایی سنتی و ...) همواره مورد توجه گردشگران بوده و ضمن قرار گرفتن در فهرست آثار ملی ایران، توسط سازمان یونسکو نیز، به ثبت جهانی رسیده است (General Directorate of Cultural Heritage, Tourism and Handicrafts of Kermanshah Province, 2025). با توجه به استقرار ۶۰ نقطه روستایی و ۱۶۸۹۲ نفر جمعیت در این منطقه و همچنین بازدید تعداد قابل توجه گردشگران از این فضاهای جغرافیایی، مدیریت مخاطره سیل می‌تواند گام مهمی در پایدار این مقاصد گردشگری باشد. از مهم‌ترین اقداماتی که می‌توان در راستای مدیریت خطر سیل در منطقه نمونه گردشگری انجام داد، پهنه‌بندی خطر سیل با استفاده از روش‌های جدید از جمله هوش مصنوعی و زیرمجموعه‌های آن از جمله الگوریتم‌های یادگیری ماشین است. زیرا به واسطه آن، با کم‌ترین هزینه می‌توان اقدامات مدیریتی لازم را برای کاهش خسارات ناشی از سیل انجام داد. با توجه به مطالب عنوان شده مهم‌ترین سوال‌های پژوهش حاضر عبارت‌اند از: پهنه‌بندی منطقه نمونه گردشگری بیستون به لحاظ مخاطره سیل با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در کلاس‌های مختلف خطر به چه صورتی است؟ چند درصد از نقاط روستایی، جمعیت و خانوارهای ساکن در سکونتگاه‌های روستایی منطقهٔ نمونه گردشگری بیستون در کلاس‌های خطر زیاد و بسیار زیاد قرار دارند؟ و عملکرد کدام الگوریتم برای پهنه‌بندی خطر سیل در منطقهٔ نمونه گردشگری بیستون مناسب‌تر است؟

منطقهٔ مورد مطالعه

منطقه نمونه گردشگری بیستون در شهرستان هرسین و استان کرمانشاه قرار گرفته است. این منطقهٔ نمونه گردشگری به‌واسطه مجموعه آثار جهانی بیستون (سنگ‌نوشته بیستون، آثار تاریخی پیرامون کوه بیستون، سراب و کوه بیستون و ...) در فهرست آثار ملی ایران قرار گرفته و توسط سازمان یونسکو نیز، به ثبت جهانی رسیده است (General Directorate of Cultural Heritage, Tourism and Handicrafts of Kermanshah Province, 2025).

این منطقهٔ نمونه گرشگری به واسطه جذابیت‌های طبیعی و انسانی در تمامی فصول سال پذیرای تعداد قابل توجهی از گردشگران داخلی و خارجی است. همچنین به دلیل شرایط آب و هوای مناسب و اراضی حاصلخیز این فضای جغرافیایی، تعداد قابل توجهی از جمعیت (شهری و روستایی) در این منطقه ساکن هستند. در شکل زیر موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه نمایش داده شده است (شکل ۱). به طور کلی الگوی ارتفاعی این ناحیه میان ۱۲۷۰ تا حدود ۳۲۰۰ متر متغیر است و بدین ترتیب آن را به پهنه‌ای کوهستانی ـ کوهپایه‌ای با اختلاف ارتفاع زیاد تبدیل کرده است. ارتفاعات میانی تا بالایی (به‌ویژه محدوده‌های واقع در ارتفاع ۱۸۰۰ تا ۲۵۰۰ متر) بخش وسیعی از شمال و شمال غرب منطقه را تشکیل می‌دهند در حالی که نواحی کم ارتفاع‌تر بیشتر در جنوب و جنوب‌شرقی واقع شده‌اند. میزان بارش سالیانه در این پهنه جغرافیایی بین ۳۹۷ تا ۵۳۵ میلیمتر در نوسان است. بارش‌ها بیشتر در بخش‌های مرکزی و تا حدودی شمال غربی مشاهده می‌شوند و در مقابل، کم‌بارش‌ترین پهنه‌ها در جنوب و جنوب‌شرقی واقع شده‌اند. این الگوی بارشی با توزیع ارتفاعی همخوان است و سبب ایجاد تفاوت‌های اکولوژیک و هیدرولوژیک در سطح منطقه شده است. در ارتباط با شیب زمین، این محدوده متشکل از شیب‌های بسیار ملایم (۰ تا ۸ درجه) تا شیب‌های تند و کوهستانی (تا حدود ۷۵ درجه) است. شیب‌های کم تا متوسط بیشتر در بخش‌های جنوبی و دشتی قرار دارند در حالی که شیب‌های شدید مرتبط با ناهمواری‌های کوهستانی بوده و در شمال و غرب منطقه قرار گرفته‌اند. مجموع این سه پارامتر نشان می‌دهد که منطقهٔ نمونه گردشگری بیستون یک واحد توپوگرافی ـ اقلیمی ناهمگون است که در آن ارتفاعات و شیب‌های زیاد در کنار الگوی بارش متغیر، نقش مهمی را در شکل‌گیری مخاطرات طبیعی مانند سیلاب دارند.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه در استان کرمانشاه و ایران

Fig. 1. Geographical location of the study area in Kermanshah province and Iran

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر با هدف کلی کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشن به عنوان زیربخشی از هوش مصنوعی در مدیریت مخاطرات محیطی با تأکید بر خطر سیلاب در منطقه نمونه گردشگری بیستون انجام شده است. برای دستیابی به هدف اصلی پژوهش با توجه

به ماهیت پیچیده و چندعلتی سیلاب، از یک چارچوب ترکیبی مبتنی بر بازدید میدانی، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، داده‌های سنجش از دور و الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده شده است. استفاده از داده‌های مکانی متنوع و مدل‌های قدرتمند تصمیم‌گیری در قالب الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظیر CART و Simple Random Forest، امکان شناسایی دقیق نواحی مستعد سیلاب و تحلیل عوامل مؤثر در وقوع آن را فراهم ساخته است. در مجموع مراحل انجام تحقیق به شرح زیر است:

در ابتدا، با هدف درک بهتر از سازوکار سیلاب و عوامل مؤثر بر آن، مطالعات پیشین داخلی و خارجی بررسی شدند. تمرکز اصلی این مرحله، بر تحلیل روش‌های مورد استفاده در پژوهش‌های گذشته در زمینه پهنه‌بندی خطر سیلاب، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌های ارتفاعی و روش‌های هوشمند تصمیم‌گیری بود. خروجی این مرحله، شناسایی اولیه پارامترهای محیطی و مکانی مؤثر در وقوع سیلاب بود.

در ادامه، بر اساس مرور منابع و همچنین اخذ نظرات کارشناسان و محققان حوزه‌های علوم جغرافیایی، منابع طبیعی، محیط زیست، سنجش از دور و مدیریت بحران، در میان عوامل مختلف و متعدد مؤثر بر وقوع سیلاب، ۱۳ متغیر کلیدی به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شد. این متغیرها طیف وسیعی از عوامل توپوگرافی، هیدرولوژیکی، پوششی و زیرساختی را شامل می‌شوند که در جدول زیر نمایش داده شده‌اند (جدول ۱).

جدول ۱- عوامل مؤثر بر وقع سیلاب و شیوهٔ استخراج آن‌ها

Table 1- Factors affecting flood occurrence and their extraction method

ردیف Row	عامل Factor	معیار Criteria	منبع / ابزار استخراج Source/Extraction Tool
1	ارتفاع Elevation	توپوگرافی Topography	ماموریت توپوگرافی رادار شاتل (GEE) SRTM (GEE)
2	شیب Slope	توپوگرافی Topography	مشتق شده از DEM Derived from DEM
3	جهت شیب Aspect	توپوگرافی Topography	مشتق شده از DEM Derived from DEM
4	انحنای سطح Plan	ژئومورفومتری Geomorphometry	مشتق شده از DEM Derived from DEM
5	انحنای مقطع Profile	ژئومورفومتری Geomorphometry	مشتق شده از DEM Derived from DEM
6	شاخص کلی انحنا Curvature	ژئومورفومتری Geomorphometry	مشتق شده از DEM Derived from DEM
7	تراکم رودخانه River density	هیدرولوژیکی Hydrological	تراکم خط (ArcGIS Pro) Line Density (ArcGIS Pro)
8	شاخص پوشش گیاهی Vegetation index	پوششی Covering	استخراج شده از تصاویر لندست ۸ Extracted from Landsat 8 images.
9	میانگین بارش سالانه Average annual precipitation	اقلیمی Climatic	داده های ایستگاه هواشناسی Weather station data
10	کاربری اراضی Land Use	انسانی Human	استخراج شده از پروداکت سنتینل۲ Extracted from Sentinel2 product
11	فاصله از جاده Distance from Road	زیرساختی Infrastructure	استخراج شده از ژئو دیتا بیس‌های موجود Extracted from existing geodatabases
12	فاصله از رودخانه Distance from River	هیدرولوژیکی Hydrological	استخراج شده از ژئودیتابیس های موجود Extracted from existing geodatabases
13	تراکم جاده Road density	زیرساختی Infrastructure	تراکم خط (ArcGIS Pro) Line Density (ArcGIS Pro)

تهیه داده‌های وقوع سیلاب و نمونه‌برداری

به‌منظور تولید لایه نقاط وقوع سیلاب، از تصاویر راداری Sentinel-1 استفاده شده است. بازهٔ زمانی مورد بررسی در این تحقیق، شامل سه دورهٔ کلیدی قبل، حین و بعد وقوع سیلاب در سال ۲۰۱۹ میلادی بود. تاریخ قبل و حین وقوع سیل مصادف با ۱ فروردین الی ۱۳ فروردین و تاریخ بعد از وقوع سیل نیز ۱۷ فروردین الی ۲۵ فروردین سال ۱۳۹۸ در نظر گرفته شده است. با استفاده از روش‌های پردازش سری زمانی تصاویر راداری در محیط Google Earth Engine، نواحی تحت تأثیر سیلاب استخراج شدند. سپس، برای اطمینان از دقت داده‌ها، ۳۰۰ نقطه سیلابی استخراج شده، با بازخورد کارشناسان محلی و مصاحبه با جامعه محلی نقاط سیلابی صحت‌سنجی شدند. در مجموع، ۶۰۰ نقطه نمونه شامل نقاط سیلابی و غیرسیلابی تهیه گردید. تفکیک این نقاط به صورت تصادفی بوده و به این صورت بوده است که ۸۰ درصد آن‌ها برای آموزش (۴۸۰ نقطه) و ۲۰ درصد برای آزمون مدل (۱۲۰ نقطه) در نظر گرفته شده‌اند.

پردازش داده‌ها و تولید لایه‌های مکانی

همان‌طور که قبلاً ذکر شد (جدول ۱)، داده‌های مکانی از منابع مختلف تهیه و پردازش شدند. مراحل آماده‌سازی داده‌ها شامل برش محدوده مورد مطالعه، هم‌مرجع‌سازی، فیلترگذاری، محاسبه شاخص‌ها، نرمال‌سازی و تبدیل به فرمت قابل‌استفاده در مدل‌های یادگیری ماشین بوده است. نرم‌افزارهای ArcGIS Pro و Google Earth Engine به‌عنوان محیط‌های اصلی تحلیل داده‌های مکانی و ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

تعیین میزان اهمیت عوامل مؤثر بر وقوع سیل

در این پژوهش، تعیین میزان اهمیت عوامل مؤثر بر وقوع سیل بر اساس اهمیت نسبی آن‌ها در مدل Random Forest صورت گرفته است.

پیاده‌سازی مدل‌های یادگیری ماشین و ارزیابی عملکرد مدل‌ها

در این مرحله، از دو الگوریتم زیر استفاده شد:

CART: مدل درخت‌های طبقه‌بندی و رگرسیون (CART) توسط بریمن و همکاران در سال ۱۹۸۴ معرفی شد. ایده اصلی این مدل، تقسیم داده‌ها به بخش‌های کوچکتر است، به‌طوری که این بخش‌ها حاوی اطلاعات تا حد امکان تفکیک‌شده باشند (Yousefi, Yonesi & Davoudimoghadam, 2022). مراحل الگوریتم CART به این نحو است که در ابتدا کار با تمامی داده‌ها در ریشه درخت (گرهای که در رأس درخت تصمیم قرار دارد) شروع می‌شود. این روش در ابتدا با استفاده از معیارهای تعیین شده تمامی داده‌ها را به‌صورتی بازگشت‌پذیر تقسیم می‌کند. سپس تمامی متغیرهای پیشگو را مورد بررسی قرار می‌دهد تا مشخص کند کدام یک بهترین تقسیم را داشته‌اند. پس از آن داده‌های ورودی براساس متغیرهای مستقلی که اهمیت بیشتری دارند تقسیم می‌شوند. این کار تا زمانی که برگ‌ها شامل داده‌هایی شوند که همگونی زیادی با یکدیگر دارند، ادامه می‌یابد (Nazariani & Fallah, 2023; Mirchooli, Gholami & Boroughani, 2024).

Simple Random Forest: الگوریتم Simple RF نسخه ساده‌سازی شده الگوریتم Random Forest است. این روش از چندین درخت تصمیم ساخته می‌شود، اما تعداد درخت‌ها، عمق درخت‌ها و پیچیدگی انتخاب ویژگی‌ها، محدودتر است. این الگوریتم راه‌حل‌های ساده را به جای راه‌حل‌های پیچیده انتخاب می‌کنند (Vandana, Chandravanshi & Akhtar, 2018; Somraj Mupparaju, Karanayil & Soundararajan, 2025).

در این پژوهش، مدل CART با استفاده از تابع ee.Classifier.smileCart در محیط Google Earth Engine اجرا شد و حالت خروجی آن روی Regression تنظیم گردید. معیار تقسیم گره‌ها در CART بر اساس کاهش واریانس تعیین شد و عمق درخت به صورت خودکار توسط الگوریتم انتخاب شد.

همچنین مدل Simple Random Forest با استفاده از تابع ee.Classifier.smileRandomForest(20) در محیط Google Earth Engine اجرا شد. به طوری که تعداد درخت‌ها برابر با ۲۰ عدد تعیین گردید که هر یک از آن‌ها یک مدل جداگانه را تهیه نموده و در نهایت، پیش‌بینی نهایی میانگین خروجی تمام درخت‌ها بود. در مجموع در این مطالعه، لایه‌های مکانی به‌همراه نقاط آموزشی به مدل‌ها داده شد و در نهایت نقشهٔ احتمال وقوع سیلاب تولید گردید.

برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها، از منحنی ROC، مساحت زیر منحنی (AUC) و ضریب همبستگی پیرسون استفاده گردید. این شاخص‌ها توانایی مدل‌ها را در تشخیص صحیح مناطق دارای سیلاب و فاقد سیلاب برآورد می‌کنند. مقدار AUC نزدیک به عدد ۱ نشان‌دهندهٔ دقت بالای مدل است. همچنین، سایر معیارهای کیفی مانند دقت[1]، حساسیت[2] و خاصیت[3] در تحلیل مدل‌ها مورد توجه قرار گرفتند.

تولید نقشه نهایی و تحلیل پهنه‌بندی

نقشه‌های حاصل از الگوریتم‌های CART و Simple RF در محیط ArcGIS Pro تلفیق و دسته‌بندی شدند. خروجی مدل‌ها به پنج کلاس خطر (از خیلی کم تا خیلی زیاد) تقسیم شد. سپس این نقشه‌ها با نقشه‌های مرجع و مشاهدات میدانی تطبیق داده شدند تا قابلیت کاربرد آن‌ها در برنامه‌ریزی مدیریت سیلاب، مدیریت بحران، برنامه‌ریزی توسعه گردشگری و توسعه پایدار شهری و روستایی مورد سنجش قرار گیرد و در این خصوص تحلیل‌های لازم صورت گیرد.

نتایج و بحث

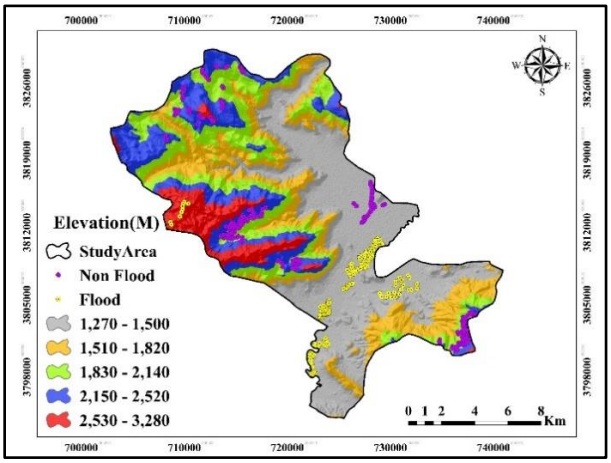
همان‌طور که در بخش روش تحقیق ذکر شد، در راستای دستیابی به هدف اصلی پژوهش، ابتدا داده‌های راداری سنجنده Sentinel-1 جهت شناسایی و استخراج نقاطی که در تاریخ وقوع سیل (۱۲ فروردین ۱۳۹۸) تحت تأثیر قرار گرفته بودند، مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها به دلیل توانایی بالای آن‌ها در نفوذ از میان ابر و ثبت اطلاعات سطح زمین در شرایط جوی نامناسب، ابزار مناسبی برای استخراج دقیق نواحی دچار آب‌گرفتگی به‌شمار می‌آیند. پس از استخراج این نقاط، برای پهنه‌بندی خطر سیلاب در منطقهٔ نمونه گردشگری بیستون، اقدام به تهیه نقشه عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب (مانند شیب، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه و ...) شده است. در ادامه بر اساس معیارهای منتخب نقشه‌های مربوط به هر یک از آن‌ها تهیه شده است.

در شکل‌های ۲ تا ۴، پارامترهای توپوگرافی مؤثر بر وقوع سیلاب ترسیم شده است. توزیع ارتفاع در منطقهٔ نمونه گردشگری بیستون در شکل ۲ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بخش‌های شمالی و شمال‌غربی منطقه دارای ارتفاعات بیشتری (بین ۲۵۲۱ تا ۳۲۸۳ متر) بوده و این نواحی عمدتاً کوهستانی هستند. در مقابل، ارتفاعات پایین‌تر (بین ۱۲۶۶ تا ۱۵۰۲ متر) در نواحی جنوبی و شرقی محدودهٔ مورد مطالعه قرار دارند. این توزیع ارتفاعی بیانگر شیب عمومی از شمال‌غرب به جنوب‌شرق است که تأثیر به‌سزایی در جهت جریان رواناب‌ها، پوشش گیاهی، و شرایط اقلیمی محلی دارد. توزیع شیب در محدوهٔ مورد مطالعه در شکل ۳، نمایش داده شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد مناطق دارای شیب زیاد (بیشتر از ۱۸ درجه) که عمدتاً با نواحی کوهستانی و ارتفاعات بالا هم‌پوشانی دارند و در شمال‌غرب و بخش‌هایی از مرکز منطقه مشاهده می‌شوند، نقش تعیین‌کننده‌ای را در تشدید سرعت جریان‌های سطحی دارند. در این نواحی، به دلیل شیب تند، نفوذپذیری سطح کاهش یافته و فرصت جذب آب باران توسط خاک کمتر می‌شود. در نتیجه، سیلاب‌ها با شدت و سرعت بیشتری به سمت پایین‌دست هدایت می‌شوند. این شرایط می‌تواند به ایجاد سیلاب‌های لحظه‌ای یا ناگهانی در پایاب حوضه منجر شود. در مقابل، نواحی دارای شیب ملایم‌تر (کمتر از ۸ درجه) که عمدتاً در دشت‌ها و نواحی جنوبی و شرقی منطقه پراکنده‌اند، با کاهش سرعت جریان و فراهم‌سازی فرصت برای نفوذ آب به داخل خاک، نقش مهمی در تجمع رواناب و افزایش پتانسیل سیلاب‌خیزی محلی ایفا می‌کنند. در این مناطق، اگر ظرفیت زهکشی طبیعی یا

1- Accuracy
2- Sensitivity
3- Specificity

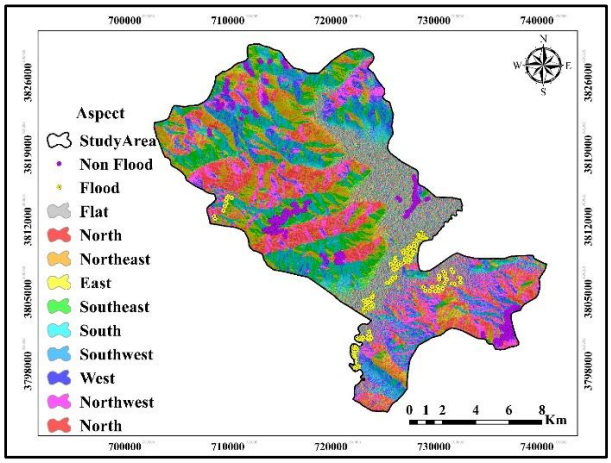
مصنوعی کافی نباشد، آب ناشی از بارندگی‌های شدید به راحتی در سطح جمع شده و می‌تواند به آب‌گرفتگی، تخریب اراضی زراعی و تهدید سکونتگاه‌های انسانی منجر گردد. در شکل ۴، جهت شیب در منطقهٔ نمونه گردشگری بیستون ترسیم شده است. جهت شیب تأثیر مستقیم و غیرمستقیمی بر رفتار رواناب و مخاطراتی همچون سیلاب دارد. جهت‌های شیب بر تابش خورشیدی، دمای خاک، رطوبت سطحی، نوع و تراکم پوشش گیاهی اثر می‌گذارند، که همگی در شدت و الگوی رواناب سطحی نقش دارند. جهت‌های شمالی، به دلیل دریافت کمتر تابش خورشید، معمولاً خنک‌تر و مرطوب‌ترند. در این نواحی، به‌ویژه اگر با شیب زیاد همراه باشند، خاک ظرفیت بیشتری برای جذب و نگهداشت رطوبت دارد، که باعث کاهش تولید رواناب و در نتیجه کاهش خطر سیلاب می‌شود. همچنین رشد پوشش گیاهی در این جهات معمولاً مطلوب‌تر بوده و پوشش گیاهی متراکم می‌تواند باعث افزایش نفوذپذیری خاک و کاهش فرسایش و رواناب سطحی گردد. در مقابل، جهت‌های جنوبی و جنوب‌غربی که بیشترین تابش را دریافت می‌کنند، مستعد افزایش دما، خشکی سطحی و کاهش رطوبت خاک هستند. این شرایط موجب کاهش نفوذ آب باران و افزایش حجم و شدت رواناب سطحی می‌شود. اگر این جهات با شیب‌های زیاد همراه باشند، سرعت حرکت رواناب بیشتر شده و خطر سیلاب‌های ناگهانی و فرسایش شدید به‌مراتب بالاتر خواهد بود. جهات شرقی و غربی نیز بسته به زمان تابش خورشید و نوع پوشش، شرایط متغیری دارند. در ساعات اولیه روز، شیب‌های شرقی سریع‌تر گرم می‌شوند و ممکن است منجر به ذوب برف یا افزایش تبخیر شوند، در حالی که دامنه‌های غربی در ساعات بعد از ظهر گرم‌تر می‌شوند و اگر با بارش همزمان شوند، می‌توانند جریان‌های سریع‌تری ایجاد کنند.

در ادامه نقشه مربوط به پارامترهای ژئومورفومتری مؤثر بر وقوع سیلاب تهیه شده است (شکل ۵ تا ۷). در محدودهٔ مورد مطالعه نقشهٔ شاخص انحنا در سطح نشان می‌دهد (شکل ۵) که مناطق با مقادیر منفی شاخص انحنا اغلب در امتداد دره‌ها، خطوط جریان طبیعی و پای دامنه‌ها قرار دارند. این نواحی که حالت مقعر دارند، تمایل به تمرکز رواناب دارند و به‌طور طبیعی، کانون‌های مستعد تشکیل سیلاب‌های متمرکز هستند. در مقابل، مناطقی با شاخص انحنای مثبت که معمولاً در قسمت‌های مرتفع و دامنه‌ها دیده می‌شوند، نشان‌دهنده محدب بودن سطح زمین هستند که رواناب را به اطراف پراکنده می‌کنند و معمولاً نقش کمتری در تجمع آب ایفا می‌کنند، اما می‌توانند باعث هدایت سریع رواناب به پایین‌دست شوند. وجود نقاط قرمز رنگ مربوط به سیلاب در مجاورت نواحی با شاخص انحنای منفی، دلالت بر همبستگی بالای این پارامتر با وقوع سیلاب دارد. شاخص انحنای مقطع در امتداد شیب و در راستای جریان آب اهمیت دارد، زیرا نشان می‌دهد که چگونه سرعت جریان ممکن است در یک منطقه افزایش یا کاهش یابد. یافته‌ها در خصوص شاخص انحنا مقطع نشان می‌دهد (شکل ۶) نواحی با انحنای مقطع منفی اغلب در پایین‌دست دامنه‌ها و در امتداد مسیل‌های طبیعی واقع شده‌اند. این مناطق باعث کاهش سرعت جریان و افزایش تجمع رواناب می‌شوند و در نتیجه، از نظر خطرپذیری سیلاب بسیار حساس هستند. از سوی دیگر، مناطقی با انحنای مقطع مثبت در قسمت‌های شیب‌دار دیده می‌شوند که باعث افزایش سرعت جریان و هدایت رواناب به سمت پایین‌دست می‌شوند و می‌توانند در تقویت پویایی سیلاب نقش داشته باشند. شاخص انحنای سطح، انحنای افقی سطح زمین را نشان می‌دهد و مشخص می‌کند که آیا رواناب به صورت جانبی همگرا یا واگرا می‌شود. یافته‌ها در خصوص این معیار نشان می‌دهد (شکل ۷) مناطق با انحنای سطح منفی (رنگ‌های سبز تا آبی) گویای این مطب هستند که زمین حالت مقعر در عرض دارد و بنابراین، رواناب‌ها به سمت یکدیگر همگرا شده و در این مناطق تمرکز می‌یابند. این شرایط، به‌ویژه در نقاط هم‌جوار با مسیل‌ها یا دره‌ها، پتانسیل وقوع سیلاب را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. این هم‌پوشانی با نقاط قرمز گزارش‌شده، تأییدکننده اهمیت انحنای سطح در تحلیل خطر سیلاب است. در مقابل، نواحی با انحنای سطح مثبت، با ماهیت محدب، تمایل به پراکندگی جریان دارند و از نظر سیلاب‌خیزی در اولویت کمتری قرار دارند، هرچند در صورت ترکیب با شیب تند، رواناب را به‌سرعت به نواحی حساس‌تر منتقل می‌کنند.



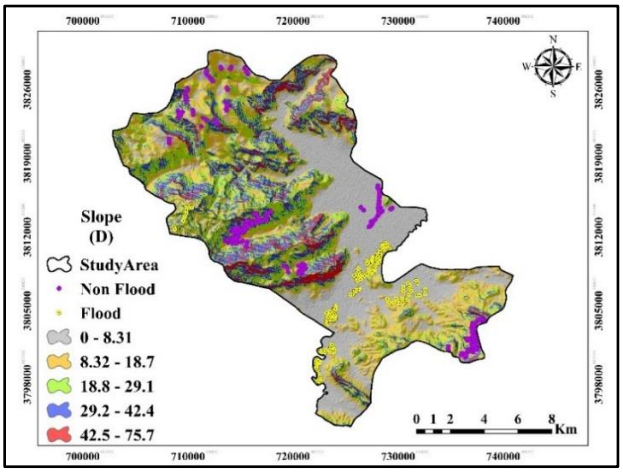
شکل ۲- نقشه ارتفاع محدوده مورد مطالعه

Fig.2. Elevation map of the study area



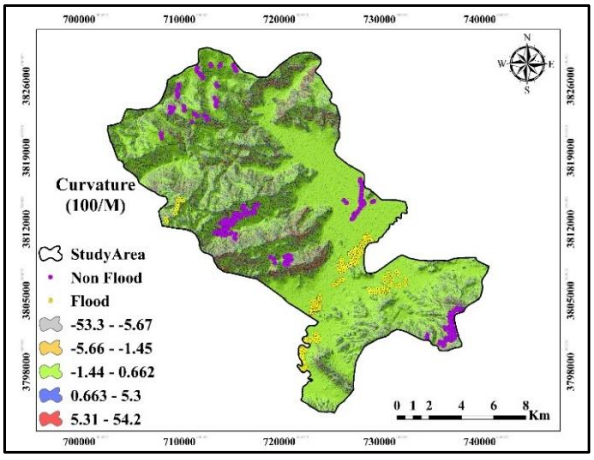
شکل ۳- نقشه شیب محدوده مورد مطالعه

Fig.3. Slope map of the study area



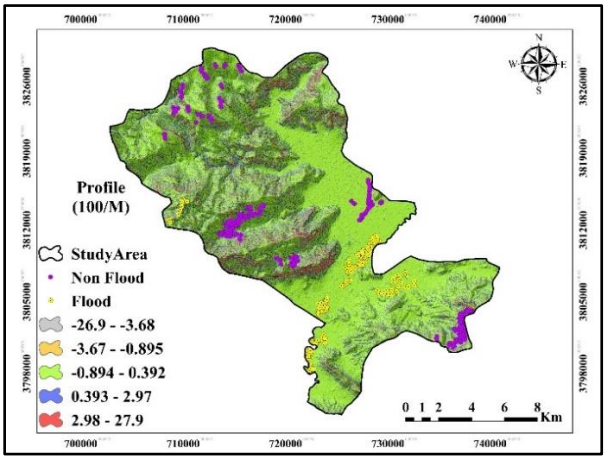
شکل ۴- نقشه جهت شیب محدوده مورد مطالعه

Fig. 4. Aspect map of the study area



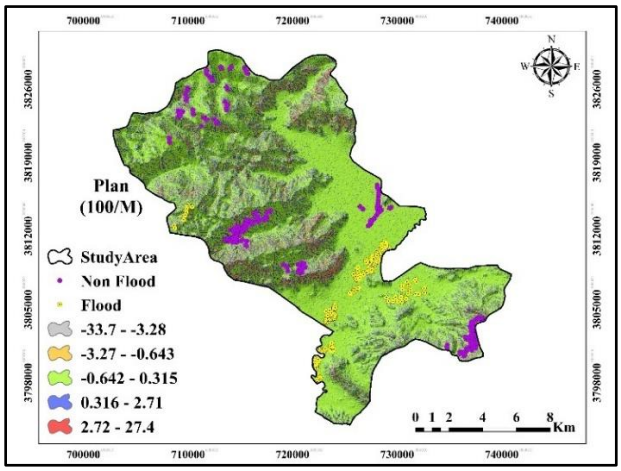
شکل ۵- نقشه انحنا در محدوده مورد مطالعه

Fig.5. Curvature map of study area



شکل ۶- نقشه انحنا مقطع در محدوده مورد مطالعه

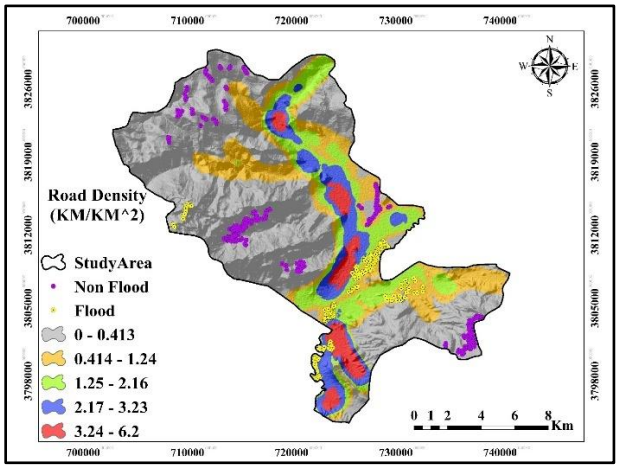
Fig.6. Cross-section curvature map of study area



شکل ۷- نقشه انحنا سطح در منطقه مورد مطالعه

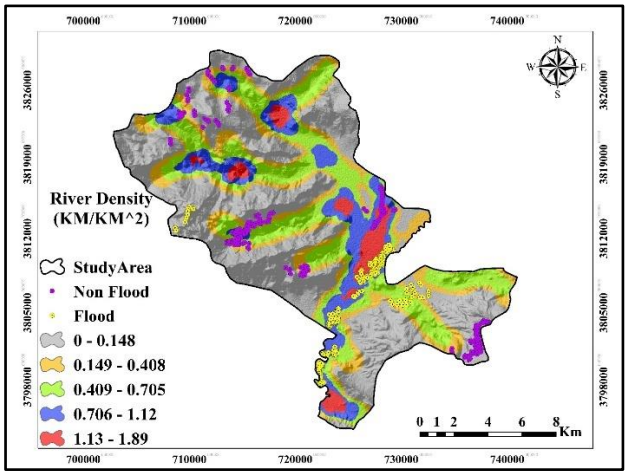
Fig. 7. Surface curvature map of study area

در ادامه نقشه‌های مربوط به پارامترهای زیرساختی و هیدرولوژیکی مؤثر بر وقوع سیلاب تهیه شده است (شکل ۸ تا ۱۱). بررسی وضعیت تراکم جاده (شکل ۸) نشان می‌دهد بخش‌های جنوب غربی، مرکزی و حاشیه شرقی منطقه با رنگ‌های آبی روشن تا تیره مشخص شده‌اند که نشان‌دهندهٔ تراکم بالای جاده‌ها هستند. این نواحی به‌واسطه وجود زیرساخت‌های حمل‌ونقل گسترده، دارای سطح پوشیده از مصالح نفوذناپذیر هستند که موجب کاهش نفوذ بارش به خاک و افزایش سرعت تولید رواناب سطحی می‌شود. همچنین، حضور گسترده جاده‌ها می‌تواند باعث قطع مسیرهای طبیعی زهکش‌ها شده و منجر به تجمع آب و جاری شدن سیلاب‌های ناگهانی گردد. این موضوع در مناطقی که با نقاط قرمز (رخدادهای سیلاب) هم‌پوشانی دارند، اهمیت بیشتری می‌یابد. یافته‌ها در خصوص تراکم رودخانه‌ها نشان می‌دهد (شکل ۹) نواحی با رنگ‌های آبی روشن و تیره مانند دامنه‌های شمالی و مرکزی منطقه، دارای بیشترین تراکم شبکه رودخانه‌ای هستند. این امر بیانگر آن است که شبکه زهکشی در این نواحی به‌شدت توسعه‌یافته و امکان انتقال سریع رواناب وجود دارد. چنین شرایطی در زمان بارش‌های شدید می‌تواند منجر به افزایش شدت و شتاب جریان سیلاب‌ها گردد. به‌ویژه در نواحی با شیب زیاد یا پوشش گیاهی ضعیف، ترکیب تراکم بالای رودخانه با بارش شدید به‌سرعت باعث سیلاب‌های ناگهانی و پرحجم خواهد شد. از سوی دیگر، نواحی با رنگ قرمز و نارنجی (تراکم پایین رودخانه) عمدتاً در حاشیه جنوبی و غربی منطقه قرار دارند. یافته‌ها در خصوص معیار فاصله از جاده نشان می‌دهد (شکل ۱۰) مناطق نزدیک‌تر به جاده‌ها بیشتر در مناطق جنوبی، شرقی، شمال شرقی و مرکزی منطقه قرار گرفته‌اند. این نزدیکی به جاده‌ها از یک‌سو ممکن است باعث افزایش سرعت تخلیه رواناب شود، اما از سوی دیگر، در صورت وقوع سیلاب، زیرساخت‌های حمل‌ونقل در معرض خطر مستقیم خواهند بود. جاده‌ها در مناطق با نفوذپذیری پایین، می‌توانند به عنوان موانع جریان عمل کرده و موجب تجمع آب و آسیب به حاشیه راه‌ها و روستاهای اطراف شوند. بنابراین، مناطق نزدیک به جاده‌ها در مناطق پست و همزمان با شیب ملایم یا سطح وسیع، نیازمند تدابیر حفاظتی بیشتری هستند. یافته‌ها در خصوص معیار فاصله از رودخانه نشان می‌دهد (شکل ۱۱)، نواحی با رنگ‌های قرمز و نارنجی که فاصله کمی با رودخانه دارند، بیشترین خطر را در برابر طغیان رودخانه‌ها در مواقع بارندگی شدید دارند. این نواحی، که در امتداد بستر رودخانه‌های دائمی و فصلی قرار دارند، مستعد پخش سیلاب و فرو رفتن در جریان‌های پرحجم آب هستند. به‌ویژه در جنوب‌غرب، شمال و مرکز منطقه، جایی که این نواحی با تراکم بالای رودخانه هم‌پوشانی دارند، باید به‌عنوان مناطق بحرانی در نظر گرفته شوند. در مقابل، نواحی دور از رودخانه‌ها اگرچه از خطر طغیان مستقیم در امان هستند، ولی در صورت عدم زهکشی مناسب می‌توانند دچار آب‌ماندگی و سیلاب‌های ایستا شوند.



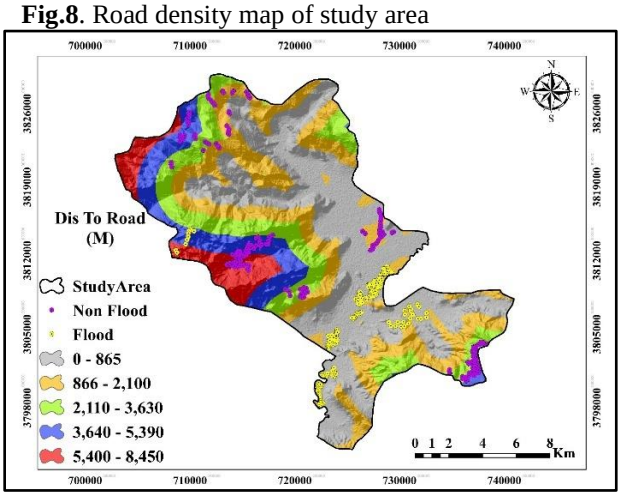
شکل ۸- نقشه تراکم جاده در محدوده مورد مطالعه

Fig.8. Road density map of study area



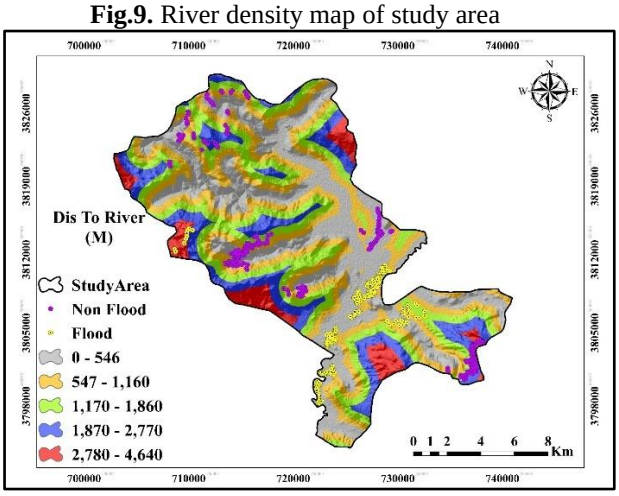
شکل ۹- نقشه تراکم رودخانه در محدوده مورد مطالعه

Fig.9. River density map of study area



شکل ۱۰- نقشه فاصله از جاده در محدوده مورد مطالعه

Fig.10. Road distance map of study area

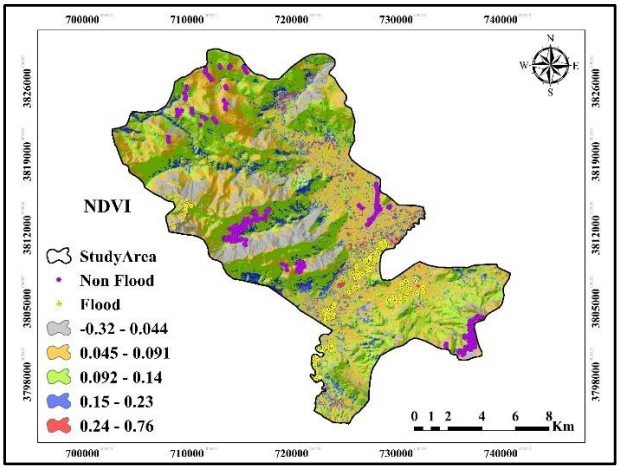


شکل ۱۱- نقشه فاصله از رودخانه در محدوده مورد مطالعه

Fig.11. River distance map of study area

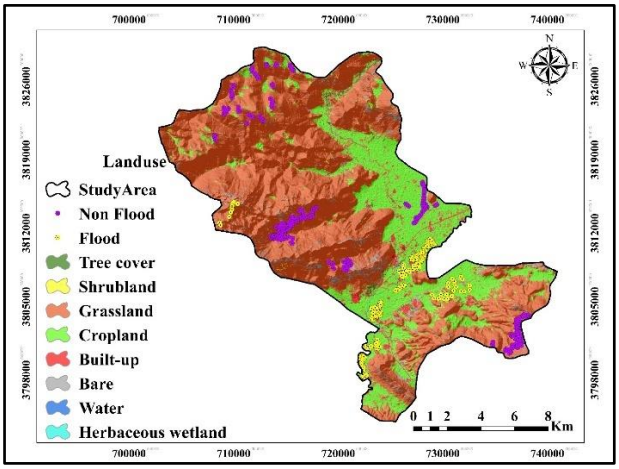
در ادامه یافته‌های حاصل از بررسی پارامترهای انسانی، پوششی و اقلیمی مؤثر بر سیلاب ارائه شده است (شکل ۱۲ تا ۱۴). یافته‌های در خصوص شاخص پوشش گیاهی نشان می‌دهد (شکل ۱۲)، مناطق با پوشش گیاهی متراکم بیشتر در نواحی شمالی، شمال غربی و بخش‌هایی از مرکز منطقه قرار دارند. این نواحی با دارا بودن شاخص NDVI بالا (نزدیک به ۰/۵۲)، نشان‌دهندهٔ وضعیت مناسب پوشش گیاهی هستند. چنین مناطقی معمولاً ظرفیت بالاتری در جذب آب باران، کاهش رواناب سطحی و ممانعت از وقوع سیلاب دارند. در مقابل، نواحی جنوب‌شرقی، غرب و بخش‌هایی از مرکز، شاخص NDVI پایین‌تری دارند و نشان‌دهندهٔ کاهش یا فقدان پوشش گیاهی مؤثر هستند. این وضعیت در صورت وقوع بارش شدید، احتمال تولید رواناب و وقوع سیلاب را افزایش می‌دهد. یافتخه‌ها حاصل از بررسی معیار کاربری اراضی در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد (شکل ۱۳)، اراضی کشاورزی، باغی، مناطق ساختمانی، اراضی بایر، جنگل‌ها و مراتع در سراسر منطقه پراکنده‌اند. بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی منطقه که با رنگ‌های صورتی، زرد و قرمز نشان داده شده‌اند، عمدتاً شامل مناطق ساختمانی، اراضی کشاورزی و بایر هستند. این نوع کاربری‌ها، به‌ویژه در صورت همراهی با پوشش گیاهی ضعیف، منجر به کاهش نفوذپذیری خاک و افزایش پتانسیل رواناب سطحی می‌شوند. در مقابل، مناطق دارای جنگل و مرتع در شمال منطقه، با دارا بودن پوشش گیاهی متراکم و کاربری طبیعی، نقش مهمی در جذب رواناب و کنترل

جریان آب دارند. یافته‌ها در خصوص شاخص بارش سالانه نشان می‌دهد (شکل ۱۴) مناطق قرمز و نارنجی کم‌بارش‌ترین بخش‌ها در محدودهٔ مورد مطالعه هستند. در مقابل، نواحی آبی و بنفش بیشترین میزان بارش را دارند و به‌عنوان پهنه‌های پربارش منطقه شناخته می‌شوند. همچنین مناطق سبز رنگ دارای بارش متوسط بوده و حالتی میانی میان دو پهنه کم‌بارش و پربارش دارند.



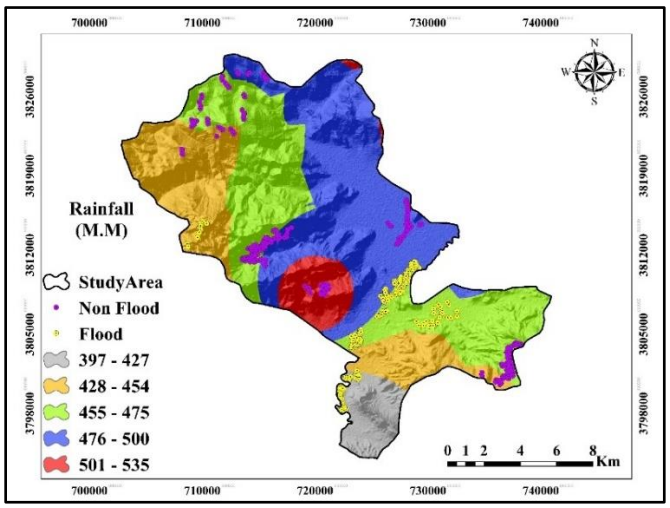
شکل ۱۲- نقشه پوشش گیاهی محدوده مورد مطالعه

Fig.12. Vegetation map of the study area



شکل ۱۳- نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه

Fig.13. Land use map of the study area



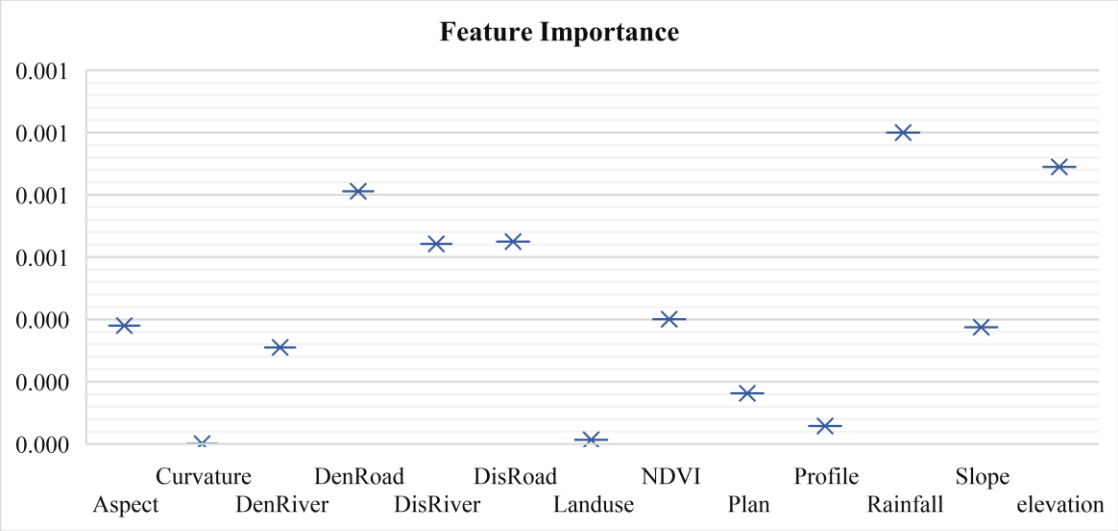
شکل ۱۴- نقشه میانگین بارش سالانه محدوده مورد مطالعه

Fig.14. Map of average annual precipitation of study area

تعیین میزان اهمیت عوامل مؤثر بر وقوع سیل

در این پژوهش، تعیین میزان اهمیت عوامل مؤثر بر وقوع سیل بر اساس اهمیت نسبی آن‌ها در مدل Random Forest انجام شده است. به این صورت که ابتدا مدل روی تمام ویژگی‌های موجود آموزش داده شد و میزان تأثیر هر ویژگی در کاهش خطای پیش‌بینی کلاس‌ها محاسبه گردید. سپس مقادیر اهمیت نرمال‌سازی شدند تا در بازه ۰ تا ۱ قرار گیرند و قابل مقایسه باشند. نتایج نشان داد که ویژگی‌هایی مانند بارش (Rainfall)، ارتفاع (Elevation) و تراکم جاده‌ها (DenRoad)، بیشترین اهمیت را در پیش‌بینی کلاس‌ها داشته‌اند، در حالی که ویژگی‌هایی مانند Curvature و Land use تأثیر نسبتاً کمی داشته‌اند.

در این فرایند مقدار نرمال‌شده ویژگی‌ها مابین ۰ و ۱ قرار گرفته است و عدد ۱ صرفاً نشان‌دهنده این است که بارش نسبت به سایر ویژگی‌ها بیشترین نقش را در کاهش خطای مدل داشته است. این مقدار یک اثر مطلق یا قطعی نیست و تنها مقایسه‌ای بین ویژگی‌ها محسوب می‌شود؛ به عنوان مثال، اگر داده‌ها تغییر کنند یا ویژگی‌های جدیدی اضافه شوند، مقدار نرمال‌شده بارش ممکن است کمتر از ۱ باشد. بر اساس این تحلیل، مهم‌ترین ویژگی‌ها انتخاب و برای آموزش مدل‌های نهایی استفاده شدند تا مدل روی مؤثرترین عوامل تمرکز نماید (شکل ۱۵).



شکل ۱۵- تعیین میزان اهمیت عوامل مؤثر بر وقوع سیل

Fig. 15. Determination of the importance of factors influencing flood occurrence

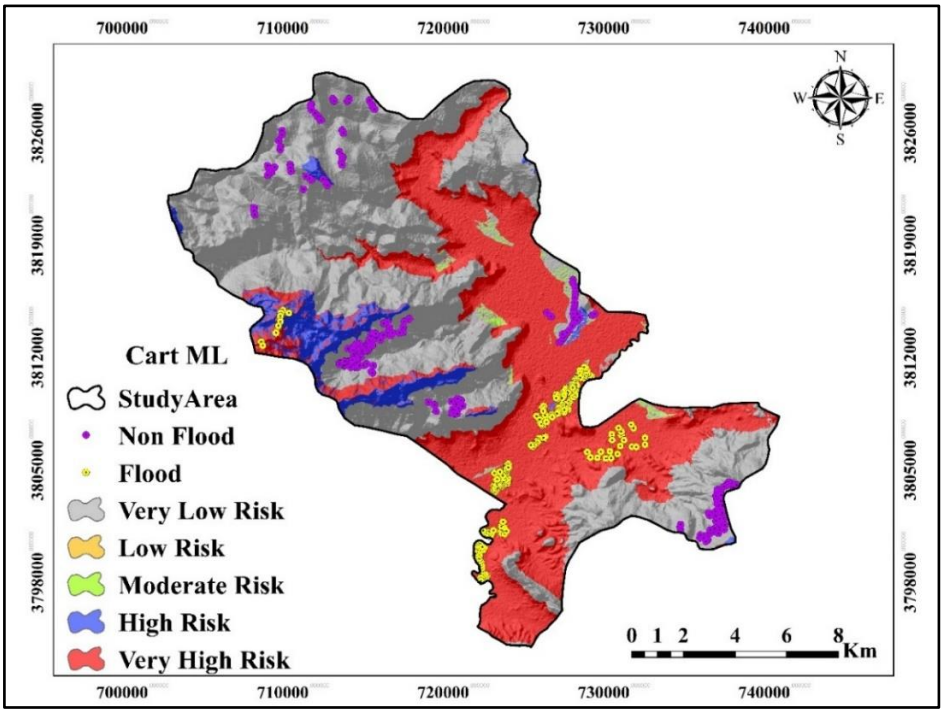
پهنه‌بندی مخاطره سیلاب در منطقه نمونه گردشگری بیستون

همان‌طور که عنوان گردید برای پهنه‌بندی خطر سیلاب در محدودهٔ مورد مطالعه از دو الگوریتم Cart و Simple Rf استفاده شده است (شکل ۱۶ و ۱۷ و جدول ۲). پهنه‌بندی مذکور مورد براساس میزان خطرپذیری در پنج طبقه اصلی شامل بسیار کم‌خطر، کم‌خطر، خطر متوسط، پرخطر و بسیار پرخطر تقسیم‌بندی صورت گرفته است. اگرچه ساختار کلی پهنه‌بندی در هر دو الگوریتم ظاهراً مشابه به نظر می‌رسد، اما در توزیع فضایی پهنه‌های مختلف خطر تفاوت‌هایی وجود دارد که از تفاوت ذاتی بین عملکرد این دو الگوریتم ناشی می‌شود.

در پهنه‌بندی صورت گرفته با استفاده از الگوریتم CART (شکل ۱۵)، تمرکز پهنه‌های بسیار پرخطر در نواحی جنوبی، جنوب‌شرقی و مرکزی محدوده مورد مطالعه قرار دارد. این مناطق که با رنگ قرمز مشخص شده‌اند، غالباً شامل زمین‌های بایر، کاربری‌های انسانی نفوذناپذیر و نواحی با پوشش گیاهی ضعیف هستند. گسترش پهنه‌های با خطر متوسط تا زیاد در اطراف این نواحی نیز نشان می‌دهد که عوامل محیطی مانند شیب ملایم، نزدیکی به جاده‌ها و جهت شیب در افزایش خطر سیلاب در این نواحی مؤثر بوده‌اند. در عوض، نواحی شمالی و شمال‌غربی منطقه که دارای پوشش گیاهی انبوه، ارتفاع بالا و کاربری طبیعی هستند، عمدتاً در کلاس‌های کم‌خطر یا بسیار کم‌خطر جای گرفته‌اند و به رنگ سبز در نقشه دیده می‌شوند. در پهنه‌بندی صورت گرفته با استفاده از الگوریتم Simple RF، نواحی شرقی، مرکزی و جنوب‌شرقی با کمتر در معرض خطر قرار گرفته‌اند و پهنه‌های قرمز رنگ در این مدل وسعت کمتری را نسبت به مدل CART دارند. دلیل این تفاوت، به ماهیت مدل Simple RF برمی‌گردد که با ترکیب مجموعه‌ای از درخت‌های تصمیم‌گیری و استفاده از ویژگی‌های محیطی مختلف مانند پوشش گیاهی، انحنای سطح، فاصله از رودخانه‌ها، تراکم جاده و میزان بارش، به دقت بالایی در طبقه‌بندی نواحی دست یافته است. با این حال، علی‌رغم تفاوت‌های فنی بین دو مدل، هر دو نقشه در یک نکته اشتراک دارند: تمرکز خطر در نواحی پایین‌دست و دشت‌های جنوبی، شرقی و حاشیه‌ای منطقهٔ نمونه گردشگری

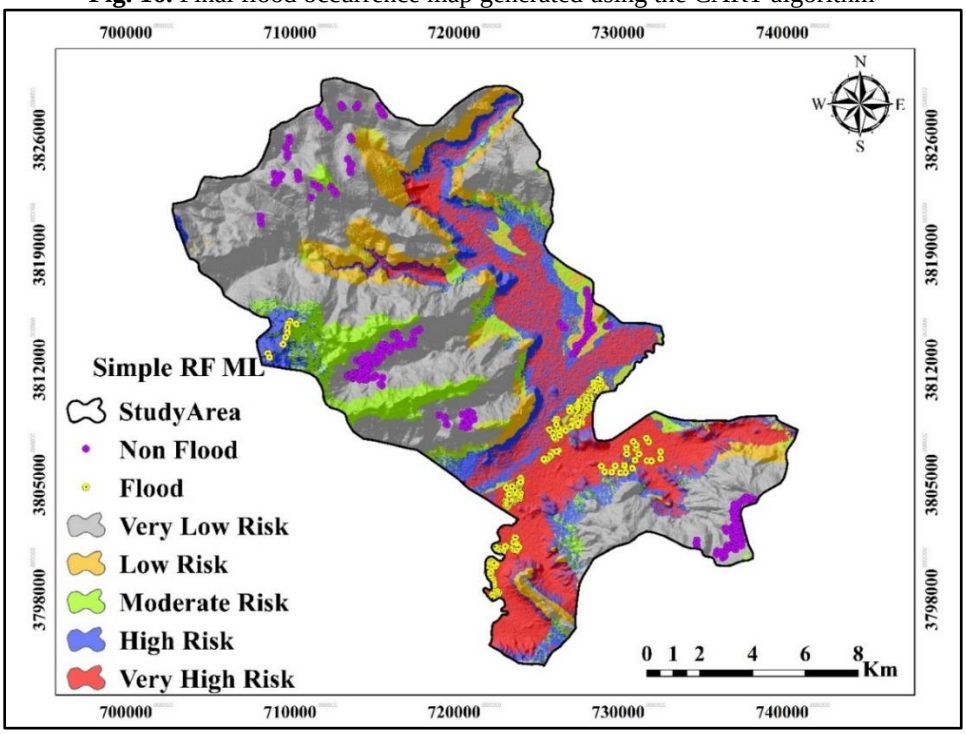
بیستون. این نواحی به دلیل داشتن ویژگی‌هایی همچون پوشش گیاهی ضعیف، تراکم بالای جاده‌ها، نزدیکی به بستر رودخانه‌ها و نفوذپذیری پایین خاک، به صورت مداوم در پهنه‌های پرخطر تا بسیار پرخطر قرار گرفته‌اند. در جمع‌بندی، می‌توان گفت که مدل CART با رویکرد طبقه‌بندی ساده‌تر و محافظه‌کارانه‌تر، برای ارائه تصویری کلی از خطر مناسب است، در حالی که مدل Simple RF با دقت بالا و حساسیت بیشتر، برای شناسایی دقیق نواحی بحرانی و اجرای سیاست‌های پیشگیرانه، ابزار مؤثرتری به‌شمار می‌رود. تلفیق نتایج هر دو مدل می‌تواند پایه‌ای قوی برای برنامه‌ریزی جامع مدیریت خطر سیلاب در منطقه بیستون را فراهم کند.

یافته‌های حاصل از مقایسه پهنه‌های مختلف خطر وقوع سیلاب، بر اساس دو الگوریتم طبقه‌بندی Cart وSimple RF نشان می‌دهد (جدول ۲) در پهنه بسیار کم‌خطر، مدل Cart با اختصاص حدود ۳۱/۴۰۰ هکتار بیشترین سطح را در این دسته ثبت کرده است، در حالی که Simple RF سطح کمتری برابر با ۲۵/۴۳۹ هکتار را به این پهنه اختصاص داده است. این اختلاف قابل توجه نشان می‌دهد که مدل Cart تمایل بیشتری به خوش‌بینی و طبقه‌بندی مناطق در سطح خطر پایین دارد. در مقابل، در پهنه کم‌خطر و خطر متوسط، مدل Simple RF سطوح به مراتب بیشتری نسبت به Cart اختصاص داده است. به‌طور خاص، در پهنهٔ کم‌خطر، مدل Simple RFحدود ۵/۳۴۷هکتار را پوشش داده که بیش از ۱۷ برابر مساحت گزارش‌شده توسط Cart در همین طبقه است. در پهنه خطر متوسط نیز، تفاوت معنادار است ۵/۸۰۳ هکتار در مقابل ۲/۹۰۴ هکتار. این امر نشان می‌دهد که Simple RF رویکرد محتاطانه‌تری داشته و مناطق بیشتری را در دسته‌های میانی ریسک طبقه‌بندی کرده است. در پهنهٔ خطر زیاد، Simple RF مجدداً مساحت بزرگ‌تری، حدود ۸/۴۴۱ هکتار نسبت به Cart ۱/۷۱۸ هکتار اختصاص داده که بیش از ۴ برابر است. این اختلاف نشان‌دهندهٔ حساسیت بالاتر مدل Simple RF در شناسایی مناطق با ریسک بالا است. در نهایت، در پهنهٔ بسیار پرخطر، مدل Cart با اختصاص حدود ۲۰/۹۴۰ هکتار، برخلاف الگوهای قبل، سطح بیشتری نسبت به Simple RF ۱۲/۶۲۸ هکتار برآورد کرده است. این نکته می‌تواند به ویژگی‌های مدل Cart و رفتار دوگانه آن در دسته‌بندی ریسک‌های بسیار بالا و بسیار پایین مرتبط باشد.در مجموع، مدل Simple RF مساحت بیشتری را در طبقات خطر متوسط تا زیاد نسبت به مدل Cart شناسایی کرده است، که بیانگر دقت و حساسیت بالاتر آن در تشخیص مناطق در معرض خطر بالقوه سیلاب است. در مقابل، مدل Cart گرایش به طبقه‌بندی خوش‌بینانه‌تر و افراطی‌تری دارد، به‌گونه‌ای که درصد بیشتری از سطح منطقه را در دو سر طیف (بسیار کم‌خطر یا بسیار پرخطر) قرار داده است. این موضوع می‌تواند در انتخاب مدل برای مدیریت ریسک و تصمیم‌گیری‌های عملیاتی حائز اهمیت باشد. به تبعیت از پهنه‌بندی صورت گرفته از طریق دو الگوریتم فوق، تدعاد و درصد روستاها، جمعیت و خانوارهای روستایی نیز در طبیقات مختلف خطر توزیع شده‌اند. در مجموع می‌توان چنین عنوان کرد که در هر دو الگوریتم مورد استفاده بیش از ۷۵ درصد سکونتگاه‌های روستایی در پهنه‌های بسیار پرخطر و خطر زیاد قرار گرفته‌اند و این درصد برای متغیرهای جمعیت روستایی و خانوارهای روستایی بیش از ۸۵ درصد بوده است که نشانگر وضعیت بحرانی فضاهای روستای و جمعیت ساکن در آن‌ها در برابر مخاطره سیلاب است.



شکل ۱۶- پهنه نهایی وقوع سیلاب با استفاده از الگوریتم Cart

Fig. 16. Final flood occurrence map generated using the CART algorithm



شکل ۱۷- پهنه نهایی وقوع سیلاب با استفاده از الگوریتم Simple RF

Fig. 17. Final flood occurrence map generated using the Simple RF algorithm

جدول ۲- مقایسهٔ نتایج دو الگوریتم مورد استفاده در خصوص پهنه‌بندی خطر سیلاب در منطقهٔ نمونهٔ گردشگری بیستون

Table 2- Comparison of the results of two algorithms applied for flood hazard zoning in the Bisotun tourism pilot area

الگوریتم Simple RF Simple RF algorithm								الگوریتم Cart Cart algorithm								
خانوار Household		جمعیت Population		روستا Village		مساحت Area		خانوار Household		جمعیت Population		روستا Village		مساحت Area		نوع پهنه
درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد	هکتار	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد	هکتار	
0.8	37	1	167	6.7	4	44.4	25439.74	11.7	562	12.3	2082	20	12	54.8	31400.77	بسیار کم‌خطر Very low risk
0.1	4	0.1	17	3.3	2	9.3	5447.82	0	0	0	0	0	0	0.5	303.17	کم خطر Low risk
12.3	588	12.7	2143	15	9	10.1	5803.2	0	0	0	0	0	0	5.1	2940.32	خطر متوسط Moderate risk
37.4	1794	36.9	6232	23.3	14	14.7	8441.84	1.1	51	1.1	189	3.3	2	3	1718.55	خطر زیاد High risk
49.5	2375	49.3	8333	51.7	31	21.4	12268.22	87.2	4185	86.6	14621	76.7	46	36.5	20940.64	بسیار پرخطر Very high risk
100	4798	100	16892	100	60	100	57300.82	100	4798	100	16892	100	6	100	57303.45	مجموع Total

صحت‌سنجی عملکرد الگوریتم‌های مورد استفاده در خصوص پهنه‌بندی خطر سیلاب

برای صحت‌سنجی عملکرد دو الگوریتم مورد استفاده از شاخص آماری AUC (مساحت زیر منحنی)، نمودار ROC و ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده است (جدول ۳ و ۴ و شکل ۱۸). نتایج نشان می‌دهند که هر دو مدل عملکرد بسیار دقیقی در پیش‌بینی خطر سیلاب داشته‌اند، اما تفاوت‌هایی هرچند جزئی در میزان دقت آن‌ها مشاهده می‌شود و با توجه به اهمیت پهنه‌بندی خطر این تفاوت ناچیز نیز بسیار مهم است. یافته‌ها نشان می‌دهد مدلSimple RF، با AUC معادل ۰/۹۸۵، دقت بسیار زیادی را در تشخیص نواحی سیل‌خیز دارد و منحنی ROC آن تقریباً به‌طور کامل به گوشه بالایی نمودار میل کرده است؛ رفتاری که نشان‌دهنده تفکیک بسیار قوی نمونه‌های مثبت و منفی است. این دقت بالا، در کنار خطای استاندارد ۰/۰۰۷ و بازه اطمینان ۹۵ درصدی بین ۰/۹۷۱ تا ۱، بیانگر پایداری و اطمینان بالای مدل در مواجهه با داده‌های واقعی منطقه‌ای است. در مقابل، مدل CART نیز با AUC برابر ۰/۹۴۲، عملکرد بسیار خوبی داشته است؛ با وجود این که دقت آن اندکی پایین‌تر از Simple RF است، همچنان در زمره مدل‌های بسیار دقیق قرار می‌گیرد. خطای استاندارد ۰/۰۱۹ و بازه اطمینان بین ۰/۹۰۵ تا ۰/۹۷۹ مدل CART، نشان می‌دهد این مدل نیز توانسته با قطعیت بالا، نواحی با سابقه سیلاب را از نواحی امن تفکیک نماید. با این حال، در مدل CART یادداشتی در جدول آمده مبنی بر اینکه در برخی از نمونه‌ها، هم‌پوشانی بین گروه‌های دارای سیلاب و فاقد سیلاب وجود داشته است. این مسئله احتمال اندکی برای بروز بایاس در برآورد دقت مدل ایجاد می‌کند، اما تأثیر آن با توجه به مقدار بسیار بالای AUC ناچیز به نظر می‌رسد. همچنین برای بررسی صحت‌سنجی پیش‌بینی‌های صورت گرفته، ضریب همبستگی پیرسون نیز میان پهنه‌های سیلابی برداشت با استفاده از تصاویر راداری و پهنه‌بندی صورت گرفته با استفاده از الگوریتم‌ها بررسی شد. نتایج نشانگر همبستگی معنادار بودن همبستگی و به نوعی صحت بالای پهنه‌بندی انجام شده با استفاده از دو الگوریتم است. با این اوصاف می‌توان چنین عنوان کرد که هر دو مدل از نظر آماری قابل اتکا هستند، با این تفاوت که Simple RF حساسیت بالاتری دارد و به‌طور خاص برای شرایط بحرانی یا تصمیم‌سازی در حوزه مدیریت خطر سیلاب، گزینه‌ای مطمئن‌تر محسوب می‌شود. به‌طور کلی، خروجی‌های مرتبط با صحت‌سنجی الگوریتم‌های مورد استفاده نشان می‌دهد (جدول ۳ و ۴ و شکل ۱۸) که انتخاب الگوریتم در چنین مطالعاتی، بر اساس سطح مورد انتظار از دقت، سرعت و نوع کاربرد نهایی تعیین می‌شود. در حالی‌کهCART با ساختاری ساده‌تر برای تبیین علمی مدل مناسب

است، مدل Simple RF به‌ویژه برای سیاست‌گذاری‌ها، اولویت‌بندی عملیات پیشگیرانه، و شناسایی دقیق مناطق بحران‌زا، گزینه‌ای کارآمدتر خواهد بود. این تفاوت در دقت و رفتار دو مدل، زمینه‌ساز تحلیل‌های عمیق‌تر در مرحله ارزیابی مساحت پهنه‌ها و توزیع جمعیتی در کلاس‌های مختلف خطر می‌شود.

جدول ۳- میزان دقت مدل‌های یادگیری ماشین

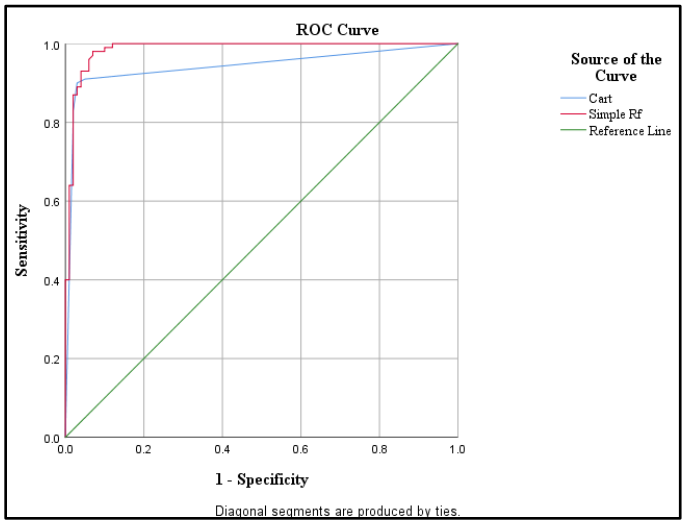
Table 3- Accuracy of machine learning models

متغیر نتیجه آزمون Test Result Variable(s)	مساحت Area	خطای استاندارد Std. Error[a]	سطح معناداری Asymptotic Sig.[b]	فاصله اطمینان ۹۵٪ Asymptotic 95% Confidence Interval	
				Upper Bound	Lower Bound
	مساحت زیر منحنی Area Under the Curve				
Simple RF	.985	.007	.000	.971	1
Cart	.942	.019	.000	.905	.979

The test result variable(s): Cart, Simple Rf has at least one tie between the positive actual state group and the negative actual state group. Statistics may be biased.

a. Under the nonparametric assumption

b. Null hypothesis: true area = 0.5



شکل ۱۸- نمودار ROC در خصوص بررسی دقت مدل‌های یادگیری ماشین

Fig. 18. ROC curve for evaluating the accuracy of machine learning models

جدول ۴- همبستگی پهنه‌های سیلابی برداشت شده با استفاده از تصاویر راداری و پهنه‌بندی انجام شده با استفاده از الگوریتم‌ها

Table 4- Correlation between floodplain extents extracted using radar imagery and flood zoning produced by algorithm

		کارت Cart	رندوم فارست ساده شده Simple Rf	سیل رادار سنتینل Flood Sentinel
سیل رادار سنتینل Flood Sentinel	همبستگی پیرسون Pearson Correlation	0.709**	0.741**	1
	معنی‌داری Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	
	تعداد N	200	200	200

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

نتیجه‌گیری

با توجه به خسارات چندبعدی جانی، مالی، زیست‌محیطی و روانی سیل از یک طرف، و کمبود اعتبارات تخصیص یافته به سکونتگاه‌های روستایی از طرف دیگر، یکی از پرکاربردترین و کم‌هزینه‌ترین اقدامات در راستای مدیریت این مخاطره، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر در مناطق روستایی است. این مهم در مناطق گردشگرپذیر از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. چراکه علاوه بر جامعه محلی که ممکن است در معرض این مخاطره قرار گیرند، ممکن است گردشگرانی را که دارای آگاهی اندکی از مخاطرات مقاصد گردشگری هستند، با تهدیدهای جدی مواجه نماید. از این‌رو هدف اصلی پژوهش حاضر پهنه‌بندی خطر سیل با کاربست الگوریتم‌های یادگیری ماشین در منطقهٔ نمونه گردشگری بیستون است. نتایج پژوهش گویای این مهم است که در خوشبینانه‌ترین حالت حدود ۳۶ درصد از مساحت منطقهٔ نمونه گردشگری بیستون و ۷۵ درصد از سکونتگاه‌های روستایی آن در کلاس‌های خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته‌اند. این نتایج گویای خطرپذیری بالا و شرایط بحرانی اکثر روستاهای این فضای جغرافیایی در برابر مخاطرهٔ سیل است. نتایج حاصل شده با یافته‌های پژوهش صادقی و جوان (Sadeghi & Javan, 2024)، صادقی و حاصلی (Sadeghi & Haseli, 2025) و شعبانی حسین آبادی و جمینی (Shabani Hosainabadi & Jamini, 2025)، که بر وجود درصد بالای مساحت و یا نقاط روستایی در معرض خطر زیاد سیل تأکید کرده‌اند، همسو می‌باشد. قرار گرفتن بخش زیادی از فضای جغرافیایی منطقه نمونهٔ گردشگری بیستون و روستاهای آن در کلاس‌های با احتمال خطر زیاد، زنگ هشداری برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزی توسعه روستایی و گردشگری شهرستان هرسین و استان کرمانشاه است. تردد گردشگران در ایام مختلف سال از این منطقهٔ نمونه گردشگری، حساسیت و اهمیت مضاعف را در خصوص مدیریت این مخاطره نمایان می‌سازد. بنابراین با توجه به ماهیت چندبعدی خسارت ناشی از خطر سیل و وقوع ناگهانی آن، مدیریت سریع این مخاطره باید در اولویت برنامه‌های اجرایی نهادها و سازمان‌های متولی قرار گیرد. نتایج پژوهش در خصوص استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین به عنوان یکی از زیربخش‌های هفت‌گانه هوش مصنوعی نشان داد خروجی‌های دو الگوریتم مورد استفاده (Cart و Simple RF) تا حدی زیادی مشابه هم بوده و در جزئیات دارای تفاوت‌های جزئی با یکدیگر هستند و نهایتاً الگوریتمSimple RF دقت بیشتری را نسبت به الگوریتم Cart داشته است. این مهم نشانگر برونداد با سطح اطمینان بالای الگوریتم‌های یادگیری ماشین در مدیریت مخاطرات محیطی است. در راستای مدیریت خاطر سیل در منطقه نمونه گردشگری بیستون و سکونتگاه‌های روستایی مستقر در آن مهمترین پیشنهادهای عملیاتی و کاربردی پژوهش حاضر عبارت‌اند از: اعمال سختگیرانه قوانین و مقررات ساخت و ساز در پهنه‌های سیل‌گیر؛ تجهیز نقاط روستایی به فناوری‌های نوین هشدار سیل؛ الزام سازمان هواشناسی به اطلاع‌رسانی دقیق و اعلام به موقع هشدار سیل؛ احداث و توسعه کانال‌های هدایت سیلاب به بستر رودخانه‌ها؛ استفاده از مصالح و تجهیزات مستحکم و پایدار در تمامی ساخت‌وسازها اعم از فضاهای مسکونی، عمومی، راه‌های ارتباطی و ...؛ توزیع و انتشار نقشه‌های پهنه‌بندی خطر به صورت پوستر در میان مدیران روستایی؛ احداث پایگاه‌های امداد و نجات در مجاورت روستاهای پرخطر؛ آموزش جامعه محلی در خصوص نحوه پیشگیری و مدیریت خطر سیل؛ نصب علائم هشدار در پهنه‌های خطر جهت اطلاع جامعهٔ محلی و گردشگران.

در راستای توسعهٔ هرچه بیشتر، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پهنه‌بندی خطر سیل و سایر مخاطرات مشابه در سکونتگاه‌های روستایی گردشگرپذیر، پیشنهاد می‌شود در آینده از الگوریتم‌های بیشتری مانند Random Forest و Mean Decrease Impurity استفاده شود.

References

Ahmadzadeh, H., & Davarpanah, M. (2023). Spatial Analysis of Flood Risk with the Approach of Landuse Planning and Management in Urmia City. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *12*(2), 63-80. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.77571.1255

Alyasiri, O. M., Selvaraj, K., Younis, H. A., Sahib, T. M., Almasoodi, M. F., & Hayder, I. M. (2024). A Survey on the Potential of Artificial Intelligence Tools in Tourism Information Services. Babylonian Journal of Artificial Intelligence, 4, 1–8. https://doi.org/10.58496/BJAI/2024/001

Asadi, M., Shayestefar, M., & Ganjaeian, H. (2026). Analysis of the Application of Artificial Intelligence in Environmental Hazard Management in Mountainous Regions. *Journal of Environmental Research in Mountainous Regions*, 2(1), 15-30. [In Persian] https://doi.org/10.22034/ermr.2025.144309.1032

Chaudhary, U., Shah, M. A. R., Shakya, B. M., & Aryal, A. (2024). Flood Susceptibility and Risk Mapping of Kathmandu Valley Watershed, Nepal. *Sustainability*, *16*(16), 7101. https://doi.org/10.3390/su16167101

Chen, N., Yao, S., Wang, C., & Du, W. (2019). A Method for Urban Flood Risk Assessment and Zoning Considering Road Environments and Terrain. *Sustainability*, *11*(10), 2734. https://doi.org/10.3390/su11102734

Ecemiş Kılıç, S., Efe Güney, M., Ayhan Selçuk, İ., Algın Demir, K., & Gür, G. (2025). An Example of Vulnerability Analysis According to Disasters: Neighborhoods in the Southern Region of Izmir. *Sustainability*, *17*(18), 8358. https://doi.org/10.3390/su17188358

Ganjaeian, H., Nosrati, M., Ebrahimi, A., & Ghisarian, S. S. (2025). Assessing the Vulnerability of Rural Areas Against Natural Hazards (Case Study: Villages of Oraman Region). *Journal of Environmental Research in Mountainous Regions*, *1*(2), 57-70. [In Persian] https://doi.org/10.22034/ermr.2024.63510

García-Madurga, M. Á., & Grilló-Méndez, A. J. (2023). Artificial Intelligence in the tourism industry: An overview of reviews. *Administrative Sciences*, *13*(8), 172. https://doi.org/10.3390/admsci13080172

General Directorate of Cultural Heritage, Tourism and Handicrafts of Kermanshah Province. (2025). Model Tourism Areas, available at: https://kermanshah.mcth.ir. [In Persian]

Herischian, M., & Mahmoudzadeh, H. (2025). Evaluation of Urban Flood Risk Mitigation Ecosystem Service (UFRM) With A Short Term Approach (2 Years), Case Study: Tabriz Metropolitan. *Journal of Geography and Environmental Hazards*. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.94245.1589

Irawan, B. (2023). Impact of artificial intelligence on the tourism industry: A literature review. *Journal of Social Science Research*, *3*(6), 4865-4878. https://j-innovative.org/index.php/Innovative

Jamini, D., Javan, F., & Atashbahar, R. (2025). Application of artificial intelligence in locating eco-camps. *Tourism Management Studies*. [In Persian] https://doi.org/10.22054/tms.2025.85190.3055

Jamini, D., Komasi, H., Yazdi, A. K., Hanne, T., & Coluccio, G. (2025). Scenario Planning for Food Tourism in Iran's Rural Areas: Ranking Strategies Using Picture Fuzzy AHP and COPRAS. *Sustainability*, *17*(21), 9524. https://doi.org/10.3390/su17219524

Javan, F., Atashbahar, R., & Motalebpoor, A. (2025). Zoning of Environmental Hazards in Tourism Destinations with Emphasis on Flooding (Case Study: Sarvabad County, Kurdistan Province). *Journal of Environmental Research in Mountainous Regions*, *1*(3), 43-56. [In Persian] https://doi.org/10.22034/ermr.2025.144141.1025

Kim, Y., & Newman, G. (2019). Climate Change Preparedness: Comparing Future Urban Growth and Flood Risk in Amsterdam and Houston. *Sustainability*, *11*(4), 1048. https://doi.org/10.3390/su11041048

Kong, H., Wang, K., Qiu, X., Cheung, C., & Bu, N. (2023). 30 years of artificial intelligence (AI) research relating to the hospitality and tourism industry. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, *35*(6), 2157-2177. https://doi.org/10.1108/IJCHM-03-2022-0354

Lacárcel, F. J. S. (2022). Main uses of artificial intelligence in digital marketing strategies linked to tourism. *Journal of Tourism, Sustainability and Well-being*, *10*(3), 215-226. https://doi.org/10.34623/mppf-r253

Lv, H., Shi, S., & Gursoy, D. (2022). A look back and a leap forward: a review and synthesis of big data and artificial intelligence literature in hospitality and tourism. *Journal of Hospitality Marketing & Management*, *31*(2), 145-175. https://doi.org/10.1080/19368623.2021.1937434.

Mirchooli, F., Gholami, I., & Boroughani, M. (2024). Flood Susceptibility Mapping of the Famnat Watershed, Gilan Province. *Water and Soil*, *37*(6), 841-853. [In Persian] https://doi.org/10.22067/jsw.2023.84146.1328

Nazariani, N., & Fallah, A. (2023). Landslide Risk Modeling using Data Mining in Hyrcanian Forests. *Journal of Watershed Management Research*, *14*(27), 123-134. [In Persian] http://dx.doi.org/10.61186/jwmr.14.27.123

Peiris, M. T. O. V. (2024). Assessment of Urban Resilience to Floods: A Spatial Planning Framework for Cities. *Sustainability*, *16*(20), 9117. https://doi.org/10.3390/su16209117

Rahimi, A., & Nastaran, M. (2025). Vulnerability Analysis of Facilities Against Flood with Emphasis on AHP Fuzzy Method (Case Study: Khorramabad City). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(1), 99-122. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.89239.1506

Ruan, X., Sun, H., Yu, Q., Shou, W., & Wang, J. (2025). A Game-Theoretic Combination Weighting–TOPSIS Integrated Model for Sustainable Floodplain Risk Assessment Under Multi-Return-Period Scenarios. *Sustainability*, *17*(12), 5622. https://doi.org/10.3390/su17125622

Sadeghi, H., & Haseli, M. (2025a). Assessment the Vulnerability of Rural Tourism Destinations Against Flood Risk in Mountainous Regions (Case Study: Chaharmahal and Bakhtiari Province). *Journal of Environmental Research in Mountainous Regions*, *1*(1), 1-14. [In Persian] https://doi.org/10.22034/ermr.2025.63294

Sadeghi, H., & Javan, F. (2024). The Evaluation of Tourist Villages of Iran in terms of Geophysical Vulnerability using Fuzzy Scenarios. *Journal of Rural Research*, *15*(4), 85-100. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jrur.2024.383580.1993

Sadeghi, H., & Javan, F. (2025). Vulnerability of Iranian tourism villages in terms of Landslide hazard using GIS. *Geography*, *23*(84), 153-170. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jiga.2025.2055364.1385

Shabani Hosainabadi, A., & Jamini, D. (2025). Zoning of Environmental Hazards in Rural Areas of Western Iran. *Journal of Sustainable Rural Development*, *9*(1), 71-82. https://doi.org/10.22034/jsrd.2025.508315.1214

Solakis, K., Katsoni, V., Mahmoud, A. B., & Grigoriou, N. (2024). Factors affecting value co-creation through artificial intelligence in tourism: a general literature review. *Journal of Tourism Futures*, *10*(1), 116-130. https://doi.org/10.1108/JTF-06-2021-0157

Somraj, N., Mupparaju, S. H., Karanayil, A., & Soundararajan, R (2025). Simple-RF: Regularizing Sparse Input Radiance Fields with Simpler Solutions. ACM Trans. *Graph.* *1*(1), 1-43. https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.19015

Tsaih, R. H., & Hsu, C. C. (2018). Artificial intelligence in smart tourism: A conceptual framework. In Proceedings of The 18th International Conference on Electronic Business (pp. 124-133). ICEB, Guilin, China, December 2-6. https://aisel.aisnet.org/iceb2018/89

Tuo, Y., Ning, L., & Zhu, A. (2021). *How Artificial Intelligence Will Change the Future of Tourism Industry: The Practice in China*. In: Wörndl, W., Koo, C., Stienmetz, J.L. (eds) Information and Communication Technologies in Tourism. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65785-7_7

Vandana, S., Chandravanshi., & Akhtar, M. J. (2018). Simple RF Energy Harvesting Circuit Using AMC Backed Bowtie Antenna. 18th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), Istanbul, Turkey, 287-290. https://doi.org/10.1109/MMS.2018.8611907

Yousefi, H., Yonesi, H. A., Davoudimoghadam, D., Arshia, A., & Shamsi, Z. (2022). Determination of Flood potential Using CART, GLM and GAM Machine learning Models. *Irrigation and Water Engineering*, *12*(4), 84-105. [In Persian] https://doi.org/10.22125/iwe.2022.150684

Zhang, H., Jiang, X., Peng, S., Zhou, K., Xu, Z., & Wang, X. (2025). Coupled Risk Assessment of Flood Before and During Disaster Based on Machine Learning. *Sustainability*, *17*(10), 4564. https://doi.org/10.3390/su17104564

Zsarnoczky, M. (2017). How does artificial intelligence affect the tourism industry?. *Vadyba*, *31*(2), 85-90. https://www.ltvk.lt/VADYBA

Vol. 15, No. 1, Spring 2026, p. 251-278 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.95484.1609 OPEN ACCESS

Analysis of Key Driving Forces of Smartization Impacts on the Economic Resilience of Rural Households in the Face of Climate Change: A Futures Studies Approach (Case Study: Ferdows, Boshrouyeh and Sarayan Counties)

Ali Akbar Anabestani [*1], **Nabiollah Taheri** [1], **Pegah Moridsadat** [1]

[1] Department of Human Geography and Spatial Planning, Faculty Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 17 September 2025

Revised: 16 November 2025

Accepted: 09 December 2025

Available Online:

18 December 2025

Keywords:

Economic Resilience

Smart Rural Development

Climate Change Adaptation

Futures Studies

Cross-Impact Analysis (MICMAC)

ABSTRACT

Smartization of rural areas, as an emerging approach to rural infrastructure development, plays a crucial role in economic empowerment and in reducing the vulnerability of rural households. Accordingly, the present study aims to identify the key factors and driving forces influencing the economic resilience of rural households in the face of climate change. In terms of purpose, the research is applied, and in terms of nature, it is descriptive analytical, adopting a futures studies approach. Data were collected through documentary review and field surveys using a structured questionnaire. The statistical population consisted of 35 experts and specialists in the field of rural development. The validity and reliability of the questionnaire were confirmed through expert judgment, and data were analyzed using MICMAC software. The findings revealed that among 50 examined indicators, 16 key driving forces were identified. In the dimension of supportive policies, the most significant factors included improved access to financial markets, increased income from agriculture-related activities and strong government support with adequate access to support facilities. In the dimension of post–climate shock recovery policies, key variables included the provision of loans and financial assistance to affected households, the capacity for business creation and development and access to suitable employment opportunities in rural areas and surrounding cities.

* Corresponding author: Ali Akbar Anabestani E-mail address: a_anabestani@sbu.ac.ir

How to cite this article: Anabestani, A. A., Taheri, N., & Moridsadat, P. (2026). Analysis of Key Driving Forces of Smartization Impacts on the Economic Resilience of Rural Households in the Face of Climate Change: A Futures Studies Approach (Case Study: Ferdows, Boshrouyeh and Sarayan Counties). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 15*(1), 251-278. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.95484.1609

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Global trends indicate that, despite the gradual decline in rural populations, these areas still host a significant portion of the world's population and play a crucial role in food production, environmental protection, and economic development. However, rural regions particularly in developing countries face serious challenges such as poverty, weak infrastructure, limited access to services, degradation of natural resources, and most notably, climate change. These challenges have placed rural households' livelihood security under substantial threat. In response to these issues, the concept of "smart villages" has emerged as an innovative model in rural development. By leveraging modern technologies, participatory governance, and locally driven solutions, this approach seeks to enhance economic resilience and improve the quality of life for rural residents. In this study, the concept of smart villages is referred to as smartization, emphasizing the systematic integration of smart technologies, governance, and innovation in rural development. While preserving traditional lifestyles, smart villages enable flexible responses to environmental and social risks. Within this context, the economic resilience of rural households-their ability to cope with the consequences of climate change-holds a central position. This study, adopting a foresight approach and focusing on the three counties of Ferdows, Boshrouyeh, and Sarayan, aims to identify the key drivers of smartization and examine its impacts on the economic resilience of rural households in the face of climate change**.**

Material and Methods

This study is applied in terms of its objective and descriptive–analytical in nature, adopting a foresight-oriented approach. The required data were collected through both documentary and field methods. Documentary data consisted of library resources, scholarly articles, and policy documents related to smart development, economic resilience, and climate change. Field data were gathered through a structured expert questionnaire based on the Cross-Impact Analysis method (MICMAC).

The designed questionnaire focused on two main dimensions: first, supportive policies and measures influencing the economic resilience of rural residents in the face of climate change; and second, key components of economic recoverability following climate-related shocks. The statistical population consisted of 35 experts and knowledgeable professionals in the fields of smart village development, economic resilience, and climate change. Participants were selected based on criteria such as research experience, involvement in applied projects, and familiarity with the socio-economic conditions of Ferdows, Boshrouyeh, and Sarayan counties. The sample included faculty members from Shahid Beheshti University and Ferdowsi University of Mashhad, as well as local experts from relevant executive organizations such as municipalities and district governorates. To validate the research instrument, expert opinions from academic specialists were employed, and the necessary revisions were made according to their suggestions. Data analysis was performed using MICMAC software. Initially, the relationships between variables were assessed on a scale from zero (no influence) to four (very high influence), and the cross-impact matrix was subsequently completed. Finally, the key variables with the highest levels of influence and dependence were identified and introduced as forward-looking drivers for enhancing the economic resilience of rural households.

Results and Discussion

The findings of this study examine the impact of smart village development on the economic resilience of rural households in the face of climate change in the three counties of Ferdows, Boshrouyeh, and Sarayan. Descriptive results showed that 80% of respondents were male and 20% female. In terms of educational background, 75% held a PhD, 20%had a Master's degree, and 5% held a Bachelor's degree. Based on data obtained from field surveys and literature review, the factors influencing economic resilience were identified in two main dimensions: supportive policies and components of recovery following crises. Using the MICMAC structural analysis model, the level of influence and dependence of these variables was assessed. In the 25×25 matrices for both dimensions, approximately 85% of cells

were filled, indicating numerous interrelationships among the variables. A total of 533 relationships were examined, of which 92 had no influence, 202 were weak, 238 were moderately strong, and 80 were very strong. Additionally, 13 potential relationships were identified in the dimension of supportive policies. In the analysis of direct influences, eight key drivers were identified in the dimension of supportive policies. These included: government support and access to backup services, increased investment in rural areas, development of communication infrastructure, growth in agricultural income, targeted regional policymaking, diversification of income sources, entrepreneurship development, and access to financial markets. These factors exerted the highest levels of influence on other variables. Regarding indirect influences, variables such as increased agricultural income, rural investment, government support, income diversification, financial management, entrepreneurship, electronic marketing, and access to financial markets showed the highest levels of indirect impact. The matrix of direct and indirect influences revealed that key factors such as government support, private sector investment, communication infrastructure, agricultural income, and regional policymaking ranked highest in terms of influence. In terms of dependency, the five variables with the greatest direct and indirect dependency were rural investment, agricultural income, government support, financial management, and income diversification. In the second-dimension components of recovery following crises six key drivers were identified: access to alternative income sources, regaining suitable employment, development of non-agricultural activities, utilization of government assistance, poverty reduction, and access to smart economic systems. These variables play a vital role in the post-crisis economic reconstruction of rural communities. In the area of indirect effects within the recovery dimension, variables such as reduced use of chemical inputs and increased compost usage, job recovery, alternative income, access to smart systems, and government support demonstrated the highest levels of indirect influence. Moreover, in the direct influence ranking matrix, variables such as financial empowerment, increased satisfaction with rural living conditions, development of non-agricultural businesses, alternative income, and job creation contributed the most to economic recovery. These factors played key roles in both direct and indirect impacts. Ultimately, the findings indicate that integrating intelligent supportive policies with effective recovery components can significantly enhance the economic resilience of rural households. The identified key drivers provide a foundation for policymakers to develop effective strategies for adapting to climate change and ensuring the economic sustainability of rural areas.

Conclusion

This study aimed to identify the key factors and drivers influencing the economic resilience of rural households in the face of climate change, with a focus on the role of smart technology in this process, in the counties of Ferdows, Sarayan, and Boshrouyeh. The findings revealed that supportive policies, such as government support, increased investment opportunities, the adoption of new technologies, electronic marketing, and support for entrepreneurship, play a significant role in enhancing the economic resilience of rural communities. Additionally, factors such as access to loans and financial facilities, the development of non-agricultural employment, the creation of diverse job opportunities, and the use of smart economic systems were found to be crucial in recovery following climate crises. The findings suggest that smart technology can improve technological infrastructure, strengthen information flow, and develop digital markets, thereby increasing the capacity of rural communities to adapt to climate change. These results align with previous domestic and international studies and emphasize the role of dual-driven factors in enhancing economic resilience. Based on these findings, it is recommended that policymakers prioritize the development of smart infrastructure, targeted financial support, the enhancement of digital skills, and the promotion of technology driven businesses to strengthen the economic resilience of rural areas. Furthermore, the design of participatory local policies focusing on empowering rural residents and encouraging them to remain in rural areas could pave the way for the sustainability of rural economies in the face of climate-related risks.

جلد ۱۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵ ، ص ۲۷۸-۲۵۱ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.95484.1609 دسترسی آزاد

تحلیل پیشران‌های کلیدی اثرات هوشمندسازی بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی با رویکرد آینده‌پژوهی (مطالعه موردی: شهرستان‌های فردوس، بشرویه و سرایان)

علی‌اکبر عنابستانی[1*]، نبی‌الله طاهری[1]، پگاه مرید سادات[1]

[1] گروه جغرافیای انسانی و آمایش، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۸

کلمات کلیدی:

تاب آوری اقتصادی

توسعه هوشمند روستایی

سازگاری با تغییرات اقلیمی

آینده‌پژوهی

تحلیل اثرات متقابل (MICMAC)

چکیده

هوشمندسازی روستاها به‌عنوان رویکردی نوین در توسعه زیرساخت‌های روستایی، نقشی کلیدی در توانمندسازی اقتصادی و کاهش آسیب‌پذیری خانوارهای روستایی ایفا می‌کند. از همین رو پژوهش حاضر با هدف شناسایی عوامل کلیدی و پیشران‌های اثرگذار بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی انجام‌شده است. این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از لحاظ ماهیت، توصیفی–تحلیلی با رویکرد آینده‌پژوهی است. داده‌ها به شیوه اسنادی و میدانی (پرسش‌نامه) گردآوری شده‌اند. جامعه آماری شامل ۳۵ نفر از کارشناسان و متخصصان حوزه توسعه روستایی است. جهت اعتباربخشی، روایی و پایایی پرسشنامه از نظرات اساتید دانشگاه استفاده گردید و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MICMAC انجام‌گرفته است. یافته‌ها نشان داد که از میان ۵۰ شاخص بررسی‌شده، ۱۶ پیشران کلیدی شناسایی شدند. در بُعد سیاست‌های حمایتی، مهم‌ترین عوامل شامل دسترسی بهتر به بازارهای مالی، افزایش درآمد فعالیت‌های وابسته به کشاورزی، حمایت دولت و دسترسی مناسب به امکانات پشتیبانی و غیره می‌باشند. همچنین در بُعد سیاست‌های بازگشت به شرایط مناسب پس از شوک‌های اقلیمی، متغیرهایی چون اعطای وام و تسهیلات به آسیب‌دیدگان، توانایی ایجاد و توسعه کسب‌وکار و دسترسی به شغل مناسب در روستا و شهرهای پیرامونی و غیره می‌باشند.

مقدمه

روندهای جمعیتی جهانی نشان می‌دهند که در سال ۱۹۵۰، حدود ۷۰ درصد از جمعیت جهان در مناطق روستایی سکونت داشتند (Soligno et al., 2015). این در حالی است که پیش‌بینی‌ها حکایت از کاهش این نسبت به ۳۴ درصد تا سال ۲۰۵۰ دارند

* نویسنده مسئول: علی اکبر عنابستانی Email: a_anabestani@sbu.ac.ir

(Singh & Patel, 2018). باوجود این تغییرات، هنوز نزدیک به ۴۷ درصد از مردم جهان و بیش از ۷۰ درصد از فقرا در نواحی روستایی زندگی می‌کنند (Holmes, 2016)،که ۵۹ درصد این جمعیت در کشورهای در حال توسعه قرار دارند (World Bank Group, 2016). این آمار نه تنها اهمیت روستاها را به‌عنوان مراکز زندگی و معیشت نمایان می‌کند، بلکه نشان‌دهندۀ پتانسیل بالای این مناطق برای توسعۀ اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی است (Emerllahu & Bogataj, 2024). علاوه بر این؛ مناطق روستایی به‌طور قابل‌توجهی در تأمین غذا، اشتغال، حفاظت از مناظر طبیعی و رشد اقتصادی کشورها نقش دارند و بخش عمده‌ای از تولید ناخالص داخلی بسیاری از کشورها از این مناطق سرچشمه می‌گیرد (Keshavarz & Moghadas, 2021; Reed et al., 2013). درحالی‌که روندهای جهانی همچنان به سمت شهرنشینی و افزایش جمعیت شهری حرکت می‌کنند، نواحی روستایی با چالش‌های خاص خود مواجه‌اند. به‌ویژه، در عصری که با سالمندی جمعیت (Van Daalen et al, 2024) و پیشرفت‌های فناوری مواجه است، مناطق روستایی به‌عنوان ساختارهایی پیچیده، نیازمند رویکردهای نوآورانه برای حفظ پویایی و تحقق توسعه پایدار هستند (Bokun & Nazarko, 2023). در این زمینه، تحولات اجتماعی و اقتصادی گسترده، ضرورت اتخاذ راهکارهای جدید برای مقابله با این چالش‌ها را آشکارتر می‌سازد. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، ایجاد اشتغال پایدار و تأمین شرایط لازم برای اجرای طرح‌های حفاظت از محیط‌زیست در مناطق روستایی است که در شرایط کنونی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است (Sobczyk, 2014).

در پاسخ به ناکارآمدی رویکردهای سنتی در روستاها، که با مشکلاتی همچون رکود اقتصادی، ضعف زیرساخت‌ها، دسترسی محدود به خدمات پایه و تخریب محیط‌زیست مواجه‌اند، مفهوم «روستاهای هوشمند» به‌عنوان یک راه‌حل نوین و کارآمد مطرح شده است (Harakal'ova, 2018). این روستاها، که مشابه شهرهای هوشمند (Salaj, Jančar, Brus & Trpin, 2011) هستند، با استفاده از فناوری‌های دیجیتال، خدمات و زیرساخت‌ها را به‌طور کارآمد مدیریت می‌کنند و این مدیریت به‌طور مستقیم به نفع ساکنان و کسب و کارهای محلی خواهد بود (Bogataj, Rogelj & Salaj, 2021). رویکرد روستاهای هوشمند می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در راستای توسعه پایدار و بهبود کیفیت زندگی در مناطق روستایی عمل کند (EU, 2018).همچنین هوشمندسازی روستاها، بدون تغییر در سبک زندگی سنتی روستاییان، سعی در ارتقاء پایداری این مناطق دارد (Somwanshi et al., 2016) و با ارائه راهکارهای انعطاف‌پذیر، متناسب با شرایط محلی، توسعۀ روستاها را امکان‌پذیر می‌سازد (Holmes, 2016).

روستاهای هوشمند، در افق بلندمدت، نه‌تنها به پایداری توسعۀ روستایی بلکه به پایداری توسعۀ شهری نیز کمک می‌کنند (Beg, 2018). کاربرد فناوری‌های نوین می‌تواند موجب تسهیل کارآفرینی، ارتقاء خدمات آموزشی، بهداشتی و زیرساختی، بهینه‌سازی منابع طبیعی و افزایش تاب‌آوری مناطق روستایی در برابر مخاطرات اقلیمی گردد (Beg, 2018; Singh & Patel, 2018). از این‌رو، حرکت به‌سوی هوشمندسازی روستاها ضرورتی اجتناب‌ناپذیر محسوب می‌شود و بی‌توجهی به آن می‌تواند چالش‌های جدی ایجاد کند. همچنین، باید توجه داشت که الگوهای هوشمندسازی، بسته به ویژگی‌های بومی و کارکرد روستاها، متفاوت خواهند بود (Viswanadham & Vedula, 2010). یکی از حوزه‌های اصلی تأثیر هوشمندسازی، افزایش تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در برابر تغییرات اقلیمی است. با افزایش وقوع مخاطراتی نظیر خشکسالی و سیل، امنیت معیشت روستاییان به‌شدت تهدید می‌شود (Keshavarz & Karami, 2018) و این امر، فقر و نابرابری اجتماعی–اقتصادی را در کشورهای در حال توسعه تشدید کرده است (Abebaw, Admassie, Kassa & Padoch, 2020; Bocchiola, Brunetti, Soncini, Polinelli & Gianinetto, 2019; Keshavarz & Moghadas, 2021).

کشاورزان خرده‌مالک، که بالغ بر ۸۰ درصد از مواد غذایی کشورهای در حال توسعه را تأمین می‌کنند، در برابر تغییرات اقلیمی آسیب‌پذیرترند (International Fund for Agricultural Development, 2016; McDowell & Hess, 2012). تغییرات اقلیمی علاوه بر کاهش دسترسی به منابع آب، خسارت‌های چشمگیری به تولیدات کشاورزی و دامی وارد کرده است (Alam, Alam, Mushtaq & Leal Filho, 2018; Birthal, Negi, Khan & Agarwal, 2015; Escarcha, Lassa, Palacpac & Zander, 2020). مناطق شهری و روستایی در قرن بیست و یکم با شدت فزاینده‌ای از پدیده‌هایی نظیر بارندگی‌های شدید، خشکسالی، سیل، یخبندان و طوفان‌ها

مواجه شده‌اند (Coumou & Rahmstorf, 2012; Liu et al., 2022) که پیامدهای اقتصادی و اجتماعی قابل‌توجهی به‌دنبال داشته‌اند (Zhang et al., 2022) تغییرات اقلیمی، به‌ویژه در فقدان زیرساخت‌های مدیریت ریسک، می‌تواند به بروز فجایع گسترده و خسارات اقتصادی در روستاها منجر شود (Nasrnia & Ashktorab, 2021; Wang, Qiao, Wang, Cao & Zhang, 2020; Nielsen, Rayamajhi, Uberhuaga, Meilby & Smith-Hall, 2013). در این میان، به‌کارگیری استراتژی‌های کارآمد در چارچوب هوشمندسازی به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری و ارتقای تاب‌آوری، گامی بنیادی در مدیریت خطرات اقلیمی محسوب می‌شود (Nam, Choi, Yoo & Jang, 2012) تاب‌آوری، که بازتابی از توانایی سیستم‌ها در مواجهه با تنش‌ها و شوک‌های بیرونی است، یکی از ارکان اصلی توسعه پایدار به شمار می‌رود (Thulstrup, 2015). ارتقای تاب‌آوری روستاها در برابر مخاطراتی نظیر سیل و خشکسالی، ضرورتی انکارناپذیر است (Quandt, Neufeldt & McCabe, 2017) و با توجه به تغییرات سریع جهانی، به یکی از اولویت‌های اساسی برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان توسعه تبدیل‌شده است (Quandt, 2018).

براساس آمار ارائه شده از سوی مرکز آمار ایران در سال ۱۳۹۵، جمعیت شهرستان‌های فردوس، بشرویه و سرایان در مجموع به ۱۰۴۸۹۹ نفر و ۳۲۸۸۶ خانوار می‌رسد. از این تعداد، ۸۱۲۶۲ نفر با ۲۴۷۱۱ خانوار در مناطق شهری ساکن هستند و ۲۳۶۳۷ نفر با ۸۱۷۵ خانوار در نواحی روستایی زندگی می‌کنند. این شهرستان‌ها به‌واسطهٔ فعالیت‌های اقتصادی مختلف مانند زراعت، باغداری، دامداری و خدمات، از جمله مناطقی هستند که در معرض شدید تغییرات اقلیمی قرار دارند. بیشتر ساکنان این مناطق به کشاورزی وابسته‌اند و در نتیجه از مشکلاتی نظیر ضعف در شبکه‌های ارتباطی، دسترسی کم به آموزش، امور مالی و دیگر خدمات اساسی رنج می‌برند. این مشکلات، همراه با خطرات طبیعی مانند سیل، خشکسالی، گردبادها، تغییرات الگوی بارش، بیماری‌ها و هجوم آفات به محصولات و دام‌ها، شرایط زندگی را دشوارتر می‌سازد. در این راستا، هوشمندسازی روستاها به همراه تاب‌آوری اقتصادی با کیفیت بالا و کارآمد می‌تواند راه حلی مؤثر باشد. این رویکرد به ساکنان روستاها کمک می‌کند تا آسیب‌پذیری اقتصادی خود را کاهش داده و در برابر خطرات طبیعی مقاوم‌تر شوند. همچنین، رشد مشاغل خدماتی در چند دههٔ اخیر در مناطق شهری، باعث افزایش مهاجرت‌های روستا به شهر در این شهرستان‌ها شده است. این امر موجب ناپایداری نواحی روستایی و عدم سازگاری با اصول رشد هوشمند (توسعهٔ درونی، حفاظت از محیط‌زیست روستا و ارتقای کیفیت زندگی روستاییان) گردیده است. بنابراین، برای تحقق هدف هوشمندسازی و تاب‌آوری اقتصادی نواحی روستایی، ضروری است که این مناطق تحت بررسی دقیق قرار گیرند. با تحلیل روندهای رشد هوشمند و شناسایی شاخص‌های مؤثر بر آن، می‌توان از ظرفیت‌های این رویکرد برای توسعه پایدار روستاها بهره برد. در این راستا، پژوهش حاضر با رویکرد آینده‌پژوهی و در چشم‌اندازی میان‌مدت (۱۰ ساله)، به بررسی اثرات هوشمندسازی بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی در شهرستان‌های فردوس، بشرویه و سرایان پرداخته است. در این راستا سؤال اصلی پژوهش عبارت است از پیشران‌های کلیدی اثرات هوشمندسازی بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی در شهرستان‌های فردوس، بشرویه و سرایان کدام‌اند؟

تاب‌آوری اقتصادی

تاب‌آوری مفهومی میان‌رشته‌ای است که ریشهٔ آن به علوم طبیعی، روان‌شناسی و مهندسی بازمی‌گردد و در چند دههٔ اخیر به‌طور گسترده‌ای وارد حوزه‌های علوم اجتماعی، جغرافیای انسانی، اقتصاد و توسعه شده است. در ساده‌ترین تعریف، تاب‌آوری به ظرفیت یک سیستم برای جذب، مقابله، بازیابی و انطباق با اختلالات و فشارهای ناگهانی یا مزمن اطلاق می‌شود، بدون آنکه ساختار اساسی یا کارکرد آن دچار فروپاشی شود (Folke, 2016; Meerow, Newell & Stults, 2016).

به مرور زمان، درک از تاب‌آوری از یک مفهوم ایستا و «بازگشت به وضعیت پیشین[1]» به رویکردی پویا و تحول‌محور[2] تغییر یافته است. در این رویکرد جدید، تاب‌آوری نه فقط به معنای مقاومت در برابر بحران، بلکه شامل توانایی سازگاری، یادگیری و نوآوری در بستر شرایط متغیر نیز هست (Davoudi, 2012; Cutter, 2016).

مفهوم تاب‌آوری اقتصادی در سال‌های اخیر به‌طور گسترده‌ای در ادبیات جغرافیای اقتصادی و برنامه‌ریزی منطقه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. این توجه روزافزون، عمدتاً ناشی از افزایش شوک‌های اقتصادی جهانی، ازجمله رکود بزرگ ۲۰۰۸ و همه‌گیری کووید-۱۹ بوده است که منجر به تبیین اهمیت توانایی مناطق در مقابله، بازیابی و سازگاری با اختلالات اقتصادی شده است (Hu & Hassink, 2020; Crespo, Suire & Vicente, 2022). تاب‌آوری اقتصادی به‌طورکلی به ظرفیت یک منطقه برای مقاومت در برابر شوک‌های بیرونی، بهبود پس از آن‌ها و تطبیق ساختار اقتصادی خود در جهت پایداری بلندمدت اشاره دارد (Martin & Sunley, 2015; Gong & Hassink, 2020) این مفهوم، بر خلاف دیدگاه‌های سنتی مبتنی بر رشد اقتصادی خطی، رویکردی چندبُعدی و پویاتر نسبت به تحول اقتصادی ارائه می‌دهد.

با این حال، یکی از چالش‌های اساسی در ادبیات، عدم اجماع بر سر تعریف دقیق و چارچوب نظری منسجم برای تاب‌آوری اقتصادی است. بسیاری از پژوهشگران بر این باورند که تاب‌آوری مفهومی «مبهم» است که بسته به بستر منطقه‌ای، اشکال مختلفی به خود می‌گیرد (Bristow & Healy, 2020; Evenhuis, 2017) به همین دلیل، واقع‌گرایی انتقادی به‌عنوان پارادایمی مفید، جهت درک ساز و کارهای علّی و بافت‌محور در تحلیل تاب‌آوری مطرح‌شده است (Gong & Hassink, 2020; Yeung, 2019). ابعاد اصلی تاب‌آوری اقتصادی را می‌توان در چهار بُعد دسته‌بندی کرد: مقاومت[3]، بهبود[4]، بازآرایی[5] و بازسازی[6] هر یک از این ابعاد می‌تواند تحت تأثیر عواملی همچون ساختار صنعتی، ظرفیت نهادی، سطح نوآوری، سرمایه اجتماعی و سیاست‌های عمومی قرار گیرد (Simmie & Martin, 2010; Boschma, 2015; Sutton & Arku, 2022). در نهایت، بررسی تاب‌آوری اقتصادی مستلزم توجه به ناهمگونی فضایی اثرات شوک‌ها، ویژگی‌های نهادی و تاریخی مناطق، و ابزارهای تحلیلی میان‌رشته‌ای است. بنابراین، رویکردهای ترکیبی کمی و کیفی در سال‌های اخیر برای مطالعه این مفهوم، مورد استقبال قرارگرفته‌اند.(Hu & Hassink, 2020; Crespo et al., 2022)

روستاها به‌عنوان واحدهای فضایی کوچک، در بستر تحولات اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی، با چالش‌های متعددی مانند مهاجرت، تغییرات اقلیمی، نوسانات قیمت محصولات کشاورزی، کاهش سرمایه‌گذاری عمومی و خصوصی و عدم تعادل بازار کار مواجه‌اند. ازاین‌رو، مفهوم تاب‌آوری اقتصادی روستایی به توانایی جوامع روستایی برای مقابله با شوک‌های اقتصادی، بهبود پس از آن‌ها و سازگاری با شرایط متغیر اقتصادی اشاره دارد (Wilson, 2020; Steiner & Atterton, 2015). تاب‌آوری اقتصادی در روستاها را نمی‌توان تنها در چارچوب شاخص‌های رشد یا تولید ناخالص داخلی سنجید، بلکه این تاب‌آوری وابسته به تنوع اقتصادی، سرمایهٔ اجتماعی، ظرفیت نهادی، زیرساخت‌های بومی، و مشارکت محلی است (Courtney & Moseley, 2021) برای مثال، روستاهایی که تنها بر یک فعالیت اقتصادی (مانند کشاورزی) متکی‌اند، نسبت به شوک‌های بیرونی مانند خشکسالی یا تغییرات بازار بسیار آسیب‌پذیرترند، درحالی‌که تنوع در مشاغل (گردشگری، صنایع دستی، خدمات بومی و...)، یک راهبرد کلیدی در افزایش تاب‌آوری اقتصادی روستایی است (Woods, Anderson & Farrington, 2021). علاوه بر تنوع اقتصادی، سرمایه اجتماعی و مشارکت محلی نیز نقشی اساسی در تاب‌آوری ایفا می‌کنند. جوامعی که از سطح بالاتری از اعتماد اجتماعی، همکاری میان نهادهای محلی و مشارکت فعال مردم برخوردارند، در دوران بحران، توانایی بیشتری برای مدیریت منابع، بسیج ظرفیت‌ها و حفظ انسجام اجتماعی دارند

1- Engineering resilience
2- Evolutionary or adaptive resilience
3- Resistance
4- Recovery
5- Re-orientation
6- Renewal

(Brown & Schafft, 2019). با توجه به چالش‌های روزافزون مانند تغییر اقلیم، مهاجرت روستاییان، و محدودیت‌های زیرساختی، سیاست‌گذاری‌های منطقه‌ای و محلی باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که نه‌تنها بر بهبود اقتصادی کوتاه‌مدت، بلکه بر توانمندسازی درازمدت و خوداتکایی جوامع روستایی تمرکز کنند (OECD, 2020).

هوشمندسازی روستاها

در سال‌های اخیر، مفهوم «هوشمندسازی روستاها» یا «روستاهای هوشمند[1]» به‌عنوان یکی از رویکردهای نوین توسعه روستایی در ادبیات توسعه پایدار جایگاه ویژه‌ای یافته است. این رویکرد با الهام از تجربهٔ شهرهای هوشمند، تلاش دارد تا با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین اطلاعاتی و ارتباطی (ICT)، زیرساخت‌های دیجیتال و نوآوری اجتماعی، به بهبود کیفیت زندگی، ارتقاء خدمات عمومی، کاهش نابرابری‌های منطقه‌ای و توانمندسازی جوامع روستایی کمک کند (Komorowski, Stanny & Banski, 2021; Talukder & Caputi, 2021). روستاهای هوشمند فراتر از مفهوم ساده دیجیتالی شدن، به دنبال ایجاد تحول بنیادین در نظام حکمرانی محلی، نظام اقتصادی و سبک زندگی روستایی هستند. در این چارچوب، دسترسی به اینترنت پرسرعت، آموزش دیجیتال، توسعهٔ کشاورزی دقیق، راه‌اندازی کسب و کارهای مبتنی بر فناوری، و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله مؤلفه‌های کلیدی این الگو به شمار می‌روند (Visvizi, Lytras & Mudri, 2022). همچنین، مشارکت فعال ساکنان محلی در فرآیند تصمیم‌گیری و طراحی راه‌حل‌ها، از الزامات اصلی موفقیت در هوشمندسازی روستاهاست، زیرا بدون تقویت سرمایه اجتماعی و ظرفیت نهادی، فناوری به‌تنهایی نمی‌تواند منجر به توسعه پایدار شود (Neumeier, 2017) همچنین؛ مفهوم «روستای هوشمند» در پاسخ به چالش‌های روستاهای معاصر همچون مهاجرت، فقر، کمبود خدمات عمومی، ضعف زیرساخت‌ها و نابرابری دیجیتال شکل گرفت. اتحادیه اروپا از پیشگامان ترویج این مفهوم بوده و در تعریف خود از روستاهای هوشمند چنین آورده است: روستاهای هوشمند، جوامعی هستند که به‌واسطه استفاده از نوآوری‌های دیجیتال و اجتماعی، در مسیر بهبود کیفیت زندگی، ارتقاء خدمات و ایجاد فرصت‌های جدید اقتصادی و اجتماعی گام برمی‌دارند (European Commission, 2019). علاوه بر این؛ هوشمندسازی روستاها تنها به معنای تجهیز روستا به فناوری‌های نوین نیست؛ بلکه فرآیندی جامع و مشارکتی برای توانمندسازی جوامع روستایی، بهبود حکمرانی محلی، ارتقاء زیرساخت‌های دیجیتال و بهره‌گیری خلاقانه از منابع بومی در مسیر توسعهٔ پایدار است (Komorowski et al., 2021; Visvizi et al., 2022).

مطالعات تجربی نشان می‌دهند که اجرای موفق پروژه‌های هوشمندسازی در روستاها نیازمند زمینه‌سازی نهادی، پشتیبانی سیاست‌گذاران، و مدل‌های بومی‌سازی‌شده بر اساس نیازها و منابع محلی است (Bacco, Berton, Gotta & Zoppi, 2019). همچنین، چالش‌هایی مانند شکاف دیجیتال، ضعف زیرساخت‌ها، نبود مهارت‌های فناورانه و تمرکزگرایی در حکمرانی، از موانع مهم در مسیر تحقق روستاهای هوشمند محسوب می‌شوند (Lobao, Adua & Hooks, 2020). در نتیجه، هوشمندسازی روستاها باید هم‌زمان با رویکردی فناورانه، اجتماعی و مشارکتی دنبال شود تا بتواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در کاهش نابرابری‌های منطقه‌ای و دستیابی به توسعه متوازن ایفای نقش کند.

تغییرات اقلیمی به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن بیست‌ویکم، تأثیرات گسترده‌ای بر معیشت، امنیت غذایی، و پایداری اقتصادی خانوارهای روستایی دارد. افزایش فراوانی خشکسالی‌ها، سیلاب‌ها، تغییر الگوهای بارندگی و کاهش دسترسی به منابع طبیعی، معیشت سنتی روستاییان، به‌ویژه در مناطق وابسته به کشاورزی را به‌شدت تهدید می‌کند (IPCC, 2022). در چنین شرایطی، تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی به‌عنوان توانایی آن‌ها برای مقابله، بازیابی و سازگاری با پیامدهای اقلیمی، به یکی از ارکان اصلی برنامه‌ریزی توسعهٔ روستایی تبدیل شده است (Brown & Schafft, 2019). در این میان، هوشمندسازی روستاها به‌عنوان یک استراتژی نوین توسعه، ظرفیت‌های چشمگیری برای ارتقاء تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی فراهم می‌سازد. استفاده از

1- Smart Villages

فناوری‌های نوین اطلاعاتی و ارتباطی (ICT)، اینترنت اشیاء (IoT)، کشاورزی دقیق، سیستم‌های هشدار زودهنگام، و پلتفرم‌های داده‌محور می‌تواند سطح آگاهی، بهره‌وری و انعطاف‌پذیری اقتصادی را در برابر شوک‌های اقلیمی افزایش دهد (Talukder & Caputi, 2021; Bacco et al., 2019). برای مثال، کشاورزی هوشمند امکان مدیریت بهینه منابع آب، کنترل آفات و پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوا را فراهم می‌کند که منجر به کاهش خسارات اقتصادی ناشی از تغییرات اقلیمی می‌شود همچنین، هوشمندسازی روستاها با تنوع بخشی به معیشت خانوارهای روستایی از طریق توسعه مشاغل دیجیتال، گردشگری روستایی، صنایع‌دستی آنلاین و بازارهای الکترونیک زمینه‌ای برای کاهش وابستگی معیشت به شرایط اقلیمی فراهم می‌آورد. این تنوع اقتصادی، یکی از ارکان اصلی تاب‌آوری اقتصادی محسوب می‌شود و به خانوارها امکان می‌دهد تا در شرایط بحرانی، از منابع درآمدی جایگزین بهره‌مند شوند (Visvizi et al., 2022; Neumeier, 2017). افزون بر آن، تقویت مشارکت اجتماعی، یادگیری جمعی، و دسترسی به اطلاعات و شبکه‌های ارتباطی از طریق زیرساخت‌های هوشمند، سرمایه اجتماعی خانوارهای روستایی را افزایش می‌دهد؛ عاملی که نقش کلیدی در توان مقابله آن‌ها با بحران‌های اقلیمی دارد (Komorowski et al., 2021; Lobao et al., 2020).

بنابراین، رابطهٔ بین هوشمندسازی روستاها و تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در برابر تغییرات اقلیمی، رابطه‌ای دوسویه و تقویت‌کننده است. از یک‌سو، فناوری ابزارهای لازم برای کاهش آسیب‌پذیری را فراهم می‌کند و از سوی دیگر، تاب‌آوری اقتصادی امکان بهره‌گیری مؤثرتر از ظرفیت‌های هوشمندسازی را مهیا می‌سازد. در نتیجه، طراحی سیاست‌های توسعه روستایی در عصر بحران اقلیمی باید بر تلفیق زیرساخت‌های هوشمند، توانمندسازی اقتصادی، و مشارکت فعال خانوارهای روستایی تمرکز داشته باشد.

مدل‌های طراحی روستای هوشمند با هدف ایجاد جوامع روستایی پایدار، قابل زندگی و از نظر فناوری توسعه یافته‌اند. این مدل‌ها شامل جنبه‌های مختلفی مانند محیط هوشمند، کشاورزی هوشمند، آموزش هوشمند، بهداشت هوشمند، انرژی هوشمند، زیرساخت هوشمند، اتصال هوشمند، گردشگری هوشمند، اقتصاد هوشمند و حکمروایی هوشمند و پایداری محیط‌زیست است (Anabestani, Zolfaghari & Tavakolinia, 2023).

در زمینهٔ اثرات هوشمندسازی بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی تاکنون پژوهشی صورت نگرفته است ولی در ادامه به تحقیقات مرتبط به این حوزه و نتایج حاصل از آن پرداخته خواهد شد. عنابستانی و همکاران (Anabestani, Zolfaghari & Tavakolinia, 2023) اشاره‌کرده‌اند رهیافت روستای هوشمند بر توسعه پایدار سکونتگاه‌های روستایی تأثیر مثبت و معناداری دارد همچنین مؤلفه‌های مدیریت و حکمرانی هوشمند و سلامت هوشمند بیشترین تأثیر را بر توسعه پایدار روستایی داشته‌اند. نوروزی (Norouzi, 2021) در مطالعهٔ خود واکاوی شاخص‌ها و امکان‌سنجی توسعه روستای هوشمند دریافته است که مهم‌ترین شاخص‌های روستای هوشمند در زمینه‌های کشاورزی، صنعت، خدمات، آموزش، سلامت و... است. و بهترین شرایط را برای روستای هوشمند بعد اقتصادی و بدترین شرایط را بعد نهادی می‌داند. عنابستانی و جوانشیری (Anabestani & Javanshiri, 2016) دریافتند که شاخص‌های اقتصادی خلاق روستایی بیشترین تأثیر را در شکل‌گیری توسعه هوشمند روستایی داشته‌اند؛ و شاخص‌های کالبدی و زیست‌محیطی درزمینه توسعه روستای هوشمند در شرایط نامناسبی قرار دارند. پراوین و همکاران (Praveen, Khan, Verma, Kumar & Peoples, 2023) دریافتند که جوامع روستایی در سراسر جهان در دسترسی به خدمات اساسی مانند مراقبت‌های بهداشتی، آموزش و بهداشت و همچنین در ارتقای رشد اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی با چالش‌های قابل‌توجهی روبه‌رو هستند؛ و زیرساخت روستای هوشمند به‌عنوان یک‌راه حل بالقوه برای چالش‌های پیش روی جوامع روستایی در سراسر جهان پدیدار شده است .زیرساخت‌های روستای هوشمند با بهره‌گیری از فناوری و نوآوری، پتانسیل افزایش دسترسی به خدمات اساسی، ارتقای رشد اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی و بهبود کیفیت کلی زندگی در جوامع روستایی را دارد. اللا و اندری (Ella & Andari, 2018) در مطالعهٔ خود در اندونزی دریافتند که مدل روستای هوشمند در توسعهٔ روستایی اندونزی پنج بعد را شامل می‌شود: ۱ منابع، (۲) فناوری، (۳) زنجیره خدمات، (۴) موسسه و (۵) پایداری و چهار مرحله توسعه که در آن .مدل حاکمیت مشارکتی به مجری اصلی آن تبدیل شده است.

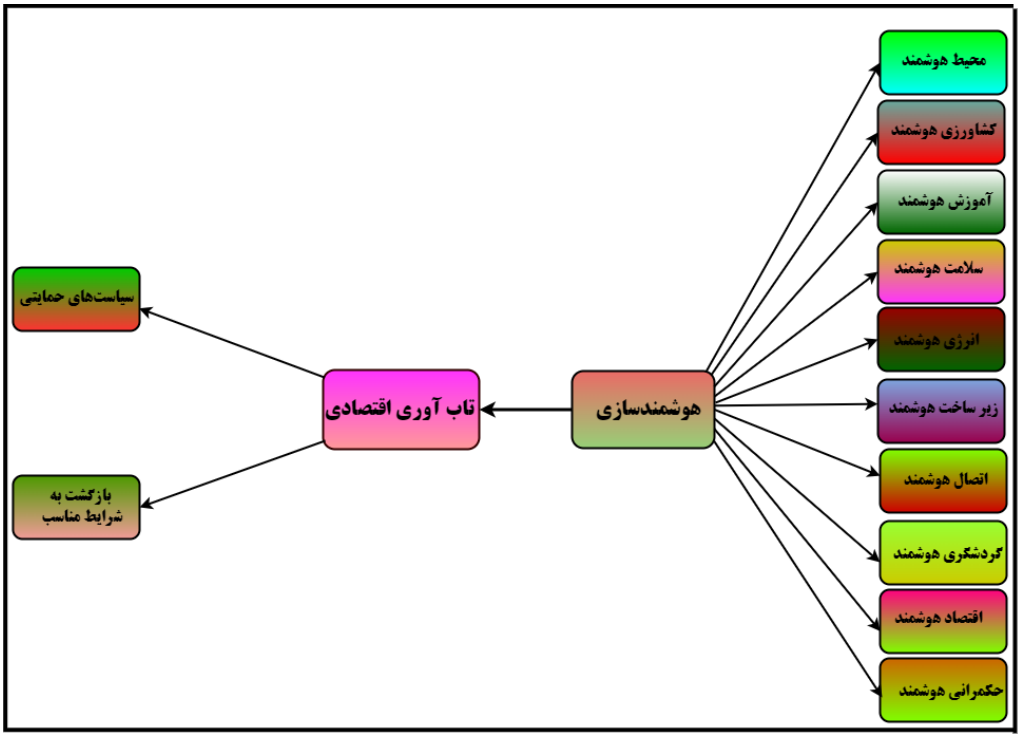
دگادا و همکاران (Degada, Thapliyal & Mohanty, 2021) اشاره‌کرده‌اند تقریباً نیمی از جمعیت جهان، حدود ۴۶٪، در مناطق روستایی زندگی می‌کنند برای ترویج توسعه اقتصادی، بهبود کشاورزی و ارتقاء بهداشت و آموزش، روستاهای هوشمند در کنار شهرهای هوشمند به‌طور فزاینده‌ای ضروری شده‌اند. یاداو و همکاران (Yadav, Vijay, Goyal & Mukherjee, 2022) مشکلات روستاهای دورافتاده را بررسی کرده و راه‌حل‌های روستای هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا[1] را برای رفع این مشکلات پیشنهاد می‌کنند و چالش‌های اصلی روستای هوشمند را عدم دسترسی به امکانات اولیه، زیرساخت‌های ضعیف و امکانات بهداشتی محدود می‌دانند. آداموویچ و زولینسکا - لیگاج (Adamowicz & Zwolińska-Ligaj, 2020) دریافتند که پتانسیل رشد هوشمند مناطق روستایی در لهستان را شامل مدیریت، کیفیت زندگی، اقتصاد، جامعه، محیط طبیعی و تحرک می‌داند، و اشاره می‌کنند که مفهوم روستای هوشمند می‌تواند در تسهیل توسعه پایدار مناطق روستایی مفید باشد. ساموئل و همکاران (Samuel et al., 2024) در مطالعه‌ای با عنوان افزایش تاب‌آوری درآمد مزرعه از طریق کشاورزی هوشمند در برابر تغییرات اقلیمی در روستای هوشمند نیکرا در هند دریافتند که متوسط درآمد یک خانوار کشاورز در روستای هوشمند نیکرا بیش از ۴۰ درصد از روستای غیرهوشمند است و در شرایط خشک‌سالی، کشاورزان روستای هوشمند نیکرا درصد وضعیت بهتری دارند و دریافتند که مداخلات هوشمند، تأثیرپذیرش فناوری، دانش بهتر به‌ویژه در طول خشک‌سالی باعث بهبود درآمد مزرعه‌داران شده است. دِف و ماتسا (Defe & Matsa, 2024) اهمیت مشارکت ذی‌نفعان در ساخت روستاهای هوشمند اقلیم پایدار در ناحیه مونزی یافته‌های تحقیق نشان داد که ایجاد تاب‌آوری و روستاهای هوشمند با اقلیم پایدار نیازمند رویکردی چندجانبه برای به اشتراک گذاشتن ایده‌ها و مسئولیت‌ها است. بسیاری از سازمان‌ها در بخش‌های ناحیه روستایی مونزی فعالیت می‌کنند و اقدامات تاب‌آور را اجرا می‌کنند. بخش تولید محصولات کشاورزی را رهبری کرد، بخش خدمات دامپزشکی بخش تولید دام را رهبری کرد. در بررسی پیشینهٔ تحقیق، مطالعات متعددی به بررسی اثرات هوشمندسازی بر توسعه پایدار روستایی و بهبود شرایط زندگی در مناطق روستایی پرداخته‌اند. بااین‌حال، شکاف مهمی که در این تحقیقات وجود دارد، عدم تمرکز کافی بر نقش هوشمندسازی در افزایش تاب‌آوری اقتصادی این مناطق در مواجهه با تغییرات اقلیمی است. این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف تحقیقاتی انجام شده است. هدف اصلی این تحقیق، مدل‌سازی تأثیرات هوشمندسازی بر تاب‌آوری اقتصادی روستاها در برابر تغییرات اقلیمی است تا از این طریق بتوان به درکی عمیق‌تر از نحوهٔ کمک فناوری‌های هوشمند به بهبود وضعیت اقتصادی و مقاومت آن‌ها در برابر چالش‌های اقلیمی دست یافت. این تحقیق نه‌تنها به بررسی تأثیرات کلی هوشمندسازی می‌پردازد، بلکه با تمرکز بر ابعاد اقتصادی، به دنبال ارائه راه‌حل‌هایی عملی برای افزایش تاب‌آوری اقتصادی در شرایط اقلیمی نامساعد است. این پژوهش دارای نوآوری‌های قابل‌توجهی است که آن را از سایر تحقیقات مشابه متمایز می‌کند. یکی از جنبه‌های برجسته این نوآوری، تمرکز ویژه بر پیوند میان هوشمندسازی و تاب‌آوری اقتصادی در مواجهه با تغییرات اقلیمی است، علاوه بر این، برتری این پژوهش نسبت به سایر مطالعات این است که برخلاف مطالعات گذشته این مطالعه عوامل کلیدی و پیشران‌های اصلی اثرات هوشمندسازی بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی را مورد سنجش قرار می‌دهد (شکل ۱).

منطقهٔ مورد مطالعه

جامعهٔ آماری پژوهش شامل کلیه سکونتگاه‌های روستایی شهرستان‌های بشرویه، سرایان و فردوس است که بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵ دارای جمعیتی معادل ۱۰۴۸۹۹ نفر در قالب ۳۲۸۸۶ خانوار می‌باشند. از این میان، ۸۱٬۲۶۲ نفر در شهرها و ۲۳۶۳۷ نفر با ۸۱۷۵ خانوار در روستاها سکونت دارند. با توجه به اهداف پژوهش و ضرورت تمرکز بر روستاهای دارای ظرفیت سرمایه‌گذاری در حوزهٔ هوشمندسازی (اقتصاد مقیاس)، روستاهای بالای ۱۰۰ خانوار به‌عنوان جامعهٔ هدف انتخاب شدند. بر این اساس، از مجموع روستاهای موجود در سه شهرستان، ۹روستا از فردوس، ۹ روستا از سرایان و ۶ روستا از بشرویه که دارای بیشترین جمعیت، زیر

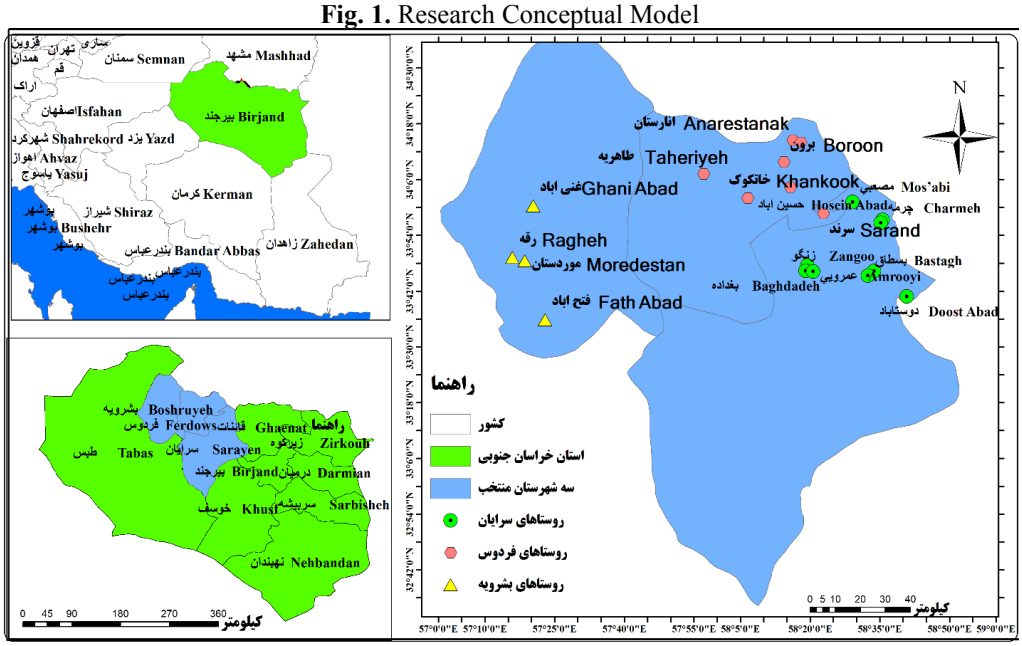
1- IoT

ساخت ارتباطی و اقتصادی، و قابلیت اجرای طرح‌های هوشمندسازی بودند، انتخاب گردیدند (جدول ۱). در مجموع، ۲۴ روستا با جمعیت ۱۷۲۸۷ نفر و ۵۶۸۳ خانوار بررسی شدند که بیش از ۷۳ درصد از کل جمعیت روستایی منطقه را شامل می‌شوند (شکل ۲).



شکل ۱- مدل مفهومی پژوهش

Fig. 1. Research Conceptual Model



شکل ۲- نقشهٔ پراکندگی روستاهای مورد مطالعه در سطح شهرستان‌ها، استان خراسان جنوبی

Fig.2. Spatial distribution map of the study villages

جدول ۱- مشخصات خانوارهای روستایی در محدوده موردمطالعه

Table 2- Characteristics of rural households within the study area

شهرستان County	ردیف No.	نام روستا Village Name	خانوار Households	جمعیت Population	شهرستان County	ردیف No.	نام روستا Village Name	خانوار Households	جمعیت Population
	1	چرمه Charmeh	291	757		13	انارستانک Anarestanak	110	263
	2	دوحصاران DoHehsaran	293	963		14	خنیک Khanik	125	333
	3	بغداده Baghdadeh	548	1808	**فردوس Ferdows**	15	کجه Kaje	112	361
	4	عمرویی Amrooyi	106	352		16	خانکوک Khankook	341	1099
سرایان Sarayan	5	مصعبی Mos'abi	224	576		17	حسین‌آباد Hoseinabad	120	385
	6	کریمو Karimo	282	679		18	طاهریه Taheriyeh	142	430
	7	زنگو Zangoo	182	590		19	منتظریه Montazerieh	224	710
	8	بسطاق Bastagh	263	852		20	غنی‌آباد Ghaniabad	426	1353
	9	دوست‌آباد Doostabad	494	1690	**بشرویه Boshrouyeh**	21	کرندKarand	201	593
	10	باغستان Baghestan	223	707		22	فتح‌آباد Fathabad	105	317
فردوس Ferdows	11	سرند Sarand	169	417		23	موردستان Moredestan	101	312
	12	برونBoroon	251	644		24	رقهRagheh	350	1096
جمعTotal								5683	17287

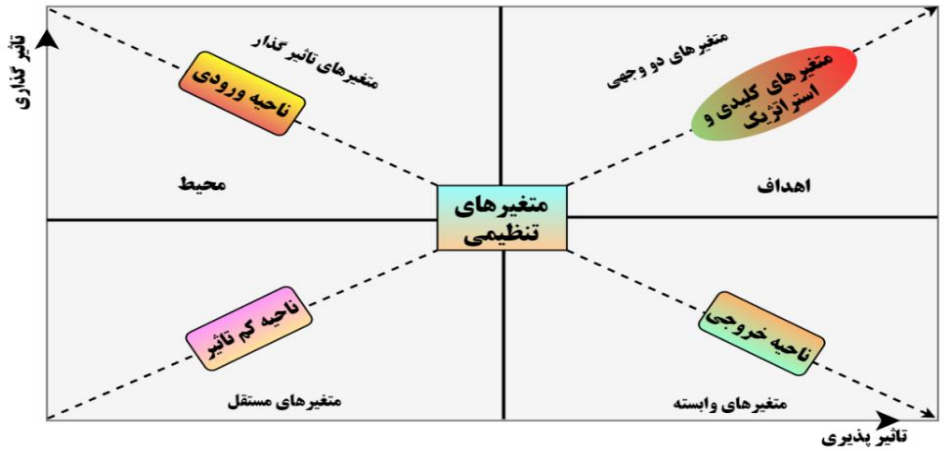
منبع مرکز آمار ۱۳۹۵ و محاسبات نگارنده، ۱۴۰۴

مواد و روش‌ها

روش پژوهش بر اساس هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی – تحلیلی با رویکرد آینده‌پژوهی است. اطلاعات پژوهش به صورت اسنادی (شامل منابع کتابخانه‌ای، مقالات علمی) و میدانی (از طریق پرسشنامه) گردآوری شده است. برای شناسایی پیشران‌های کلیدی اثرات هوشمندسازی بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی در شهرستان‌های فردوس، بشرویه و سرایان، از پرسشنامهٔ تخصصی مبتنی بر روش MICMAC استفاده شد. این پرسشنامه در دو بعد سیاست‌های حمایتی تاب‌آوری اقتصادی روستاییان در مواجهه با تغییرات اقلیمی و مؤلفه‌های بازگشت به شرایط مطلوب تاب‌آوری اقتصادی پس از مواجهه با تغییرات اقلیمی جدول ۲ طراحی گردید. جامعهٔ نمونه این پژوهش شامل خبرگان و متخصصان آگاه در حوزه‌های هوشمندسازی روستا، تاب‌آوری اقتصادی و تغییرات اقلیمی بود. تعداد خبرگان بر اساس نمونه‌گیری هدفمند و منطبق با منطق روش MICMAC تعیین شد؛ در این روش هدف تعمیم آماری نیست، بلکه بهره‌گیری از نظر افراد دارای تجربه و شناخت عمیق از موضوع است. انتخاب مشارکت‌کنندگان تا مرحله «اشباع نظری» ادامه یافت؛ به‌طوری‌که افزودن افراد جدید منجر به دریافت اطلاعات یا دیدگاه تازه‌ای نمی‌شد و بر این اساس تعداد ۳۵ نفر به‌عنوان حجم نهایی نمونه تأیید گردید. این افراد بر اساس معیارهایی چون سابقهٔ فعالیت پژوهشی، مشارکت در پروژه‌های مرتبط، و آشنایی با شرایط اجتماعی- اقتصادی منطقه انتخاب شدند. نمونه‌ها از میان اساتید دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه فردوسی مشهد، همچنین کارشناسان شهرداری و فرمانداری شهرستان‌های مورد مطالعه انتخاب شدند.

برای سنجش روایی و اعتبار ابزار پژوهش، از نظر متخصصان دانشگاهی استفاده شده و اصلاحات لازم بر اساس پیشنهادهای آنان اعمال شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MICMAC انجام شد. در این نرم‌افزار، ابتدا روابط تأثیرگذاری متقابل متغیرها از ۰ تا ۴ رتبه‌بندی شده و سپس با استفاده از ماتریس تأثیرات متقابل، شاخص‌های دارای بیشترین تأثیرگذاری و اثرپذیری شناسایی شدند. در ادامه، شاخص‌های کلیدی و دارای پتانسیل برای برنامه‌ریزی آینده‌نگر در زمینه تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی معرفی شده‌اند.

روش MICMAC برای شناسایی متغیرهای کلیدی در یک سیستم پیچیده طراحی شده و با تحلیل روابط بین آن‌ها از دیدگاه خبرگان، نقش و اهمیت هر متغیر را مشخص می‌کند. ابتدا متغیرها شناسایی، سپس میزان تأثیر متقابل آن‌ها در قالب یک ماتریس امتیازدهی می‌شود. در نهایت، با تحلیل نتایج، متغیرهای اثرگذار و اثرپذیر تعیین‌شده و جایگاه آن‌ها در نمودار تحلیلی مشخص می‌گردد تا تصمیم‌گیری راهبردی تسهیل شود. (شکل ۳). در روشMICMAC ، مجموع سطرها و ستون‌های ماتریس نشان‌دهندهٔ میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری متغیرهاست. توزیع متغیرها در نمودار دو بعدی می‌تواند ساختار سیستم را پایدار با الگوی L و متغیرهای کلیدی، مستقل و وابسته یا ناپایدار (با پراکندگی نامنظم و تعاملات پیچیده) نشان دهد. این تحلیل به شناسایی تدریجی متغیرهای کلیدی و درک بهتر روابط ساختاری کمک می‌کند.



شکل ۳- تحلیل تأثیرگذاری و تأثیرپذیری متغیرهای مأخذ (Anabestani et al., 2023).

Fig.3. Analysis of the influence and dependency of the reference variables

نتایج و بحث

یافته‌های توصیفی پژوهش نشان می‌دهد که از مجموع پاسخ دهندگان ۸۰ درصد آن‌ها مرد بوده و ۲۰ درصد آن‌ها زن بوده‌اند. از نظر میزان تحصیلات، ۷۵ درصد پاسخ‌گویان داری مدرک دکتری بوده‌اند، ۲۰ درصد دارای مدرک کارشناسی ارشد بودند و ۵ درصد پاسخگویان دارای مدرک لیسانس بودند. در این پژوهش با توجه به مطالعات میدانی و کتاب‌خانه‌ای، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار هوشمندسازی بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی در شهرستان‌های فردوس، بشرویه و سرایان در دو بعد (سیاست‌های حمایتی تاب‌آوری اقتصادی روستائیان در مواجهه با تغییرات اقلیمی و مؤلفه‌های بازگشت به شرایط مناسب تاب‌آوری اقتصادی روستائیان بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی) شناسایی شد. در مرحله بعد استفاده از مدل معادلات ساختاری (MICMAC) اثرات متقابل هرکدام از شاخص‌های ابعاد مذکور مورد بررسی مطالعه شده است تا تأثیرگذارترین و تأثیرپذیرترین متغیرها بر امنیت غذایی در ابعاد موردبررسی شناسایی شوند (جدول ۳). با توجه به ابعاد ماتریس‌های سیاست‌های حمایتی تاب‌آوری اقتصادی (۲۵×۲۵) و مؤلفه‌های بازگشت به شرایط مناسب تاب‌آوری اقتصادی (۲۵×۲۵) درجه پرشدگی آن‌ها بین (۸۰/۶۴ تا ۸۵/۲۸) درصد است که نشان می‌دهد عوامل انتخاب شده تأثیر نسبتاً زیادی روی‌هم گذاشته‌اند از مجموع ۵۳۳ رابطه قابل ارزیابی در این ماتریس، ۹۲ رابطه با مقدار صفر وجود داشته است که این نشان می‌دهد این عامل‌ها بر همدیگر

تأثیرگذار و تأثیرپذیر نبوده‌اند. و از مجموع ۵۳۳ رابطه ۲۰۲ رابطه عددشان یک بوده است که می‌توان گفت این عوامل تأثیر کمی بر همدیگر داشته‌اند و همچنین ۲۳۸ رابطه، عددشان ۲ بوده است که نشان از رابطه تأثیرگذاری نسبتاً قوی بین این عوامل بوده است و ۸۰ رابطه عددشان ۳ بوده است که حاکی از آن است بین عامل‌های کلیدی موجود رابطه بسیار قوی وجود داشته است و می‌توان گفت این عوامل از تأثیرگذاری و تأثیرپذیری زیادی برخوردار بوده‌اند؛ و در نهایت در بعد سیاست‌های حمایتی تاب‌آوری اقتصادی روستائیان در مواجهه با تغییرات اقلیمی ۱۳ رابطه با مقدار P وجود داشته است که نشان می‌دهد بین این عامل‌ها رابطه بالقوه وجود داشته است (جدول ۲).

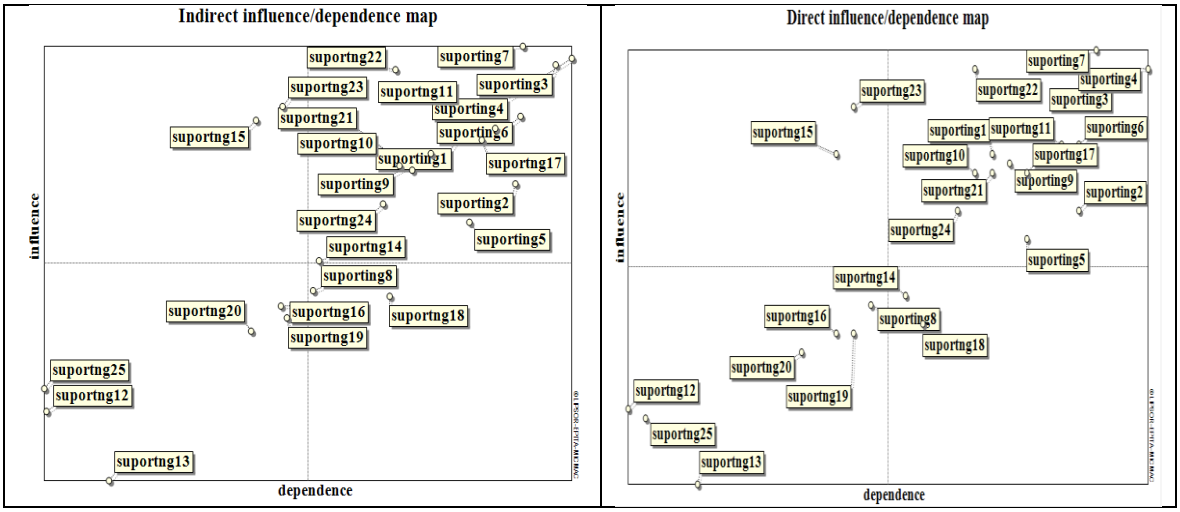
پیشران‌های کلیدی تأثیرات مستقیم سیاست‌های حمایتی تاب‌آوری اقتصادی روستائیان در مواجهه با تغییرات اقلیمی

با توجه به نقش پراکندگی خروجی شکل ۴ (الف) تأثیرات مستقیم سیاست‌های حمایتی تاب‌آوری اقتصادی روستائیان در مواجهه با تغییرات اقلیمی از ۲۵ عامل کلیدی تشکیل‌شده است. همچنین در بررسی اثرات غیرمستقیم مطابق شکل ۴ (ب) بیشترین توزیع پراکندگی شاخص‌ها را به ترتیب متغیرهای دو وجهی (۱۵) عامل، کم تأثیر (مستقل) ۶ عامل ، متغیرهای تأثیرگذار ۲ و متغیرهای تأثیرپذیر ۲ عامل تشکیل می‌دهند (جدول ۳).

جدول ۲- تحلیل داده‌های ماتریس و تأثیرات متقاطع

Table 2- Matrix Data Analysis and Cross-Impact Effects

مؤلفه‌های بازگشت به شرایط مناسب تاب‌آوری اقتصادی Returning to Suitable Economic Resilience Components	سیاست‌های حمایتی تاب‌آوری اقتصادی Supportive Policies for Economic Resilience	اطلاعات ماتریس Matrix Information	
25	25	Matrix Dimensions	**ابعاد ماتریس**
2	4	Number of Repetitions	**تعداد تکرار**
121	92	Number of Zeros	**تعداد صفر**
263	202	Number of Ones	**تعداد یک**
201	238	Number of Twos	**تعداد دو**
28	80	Number of Threes	**تعداد سه**
12	13	Number of P	**تعداد p**
504	533	Total	**جمع**
80.64	85.28	Degree of Density	**درجه پرشدگی**



ب: تأثیرات غیرمستقیم **الف: تأثیرات مستقیم**

شکل ۴- اثرات مستقیم و غیرمستقیم سیاست‌های حمایتی تاب‌آوری اقتصادی روستائیان در مواجهه با تغییرات اقلیمی

Fig.4. Direct and indirect effects of supportive policies on the economic resilience of rural households in the face of climate changes

جدول ۳- تحلیل وضعیت اثرگذاری مستقیم و غیرمستقیم عوامل سیاست‌های حمایتی تاب‌آوری اقتصادی روستائیان در مواجهه با تغییرات اقلیمی

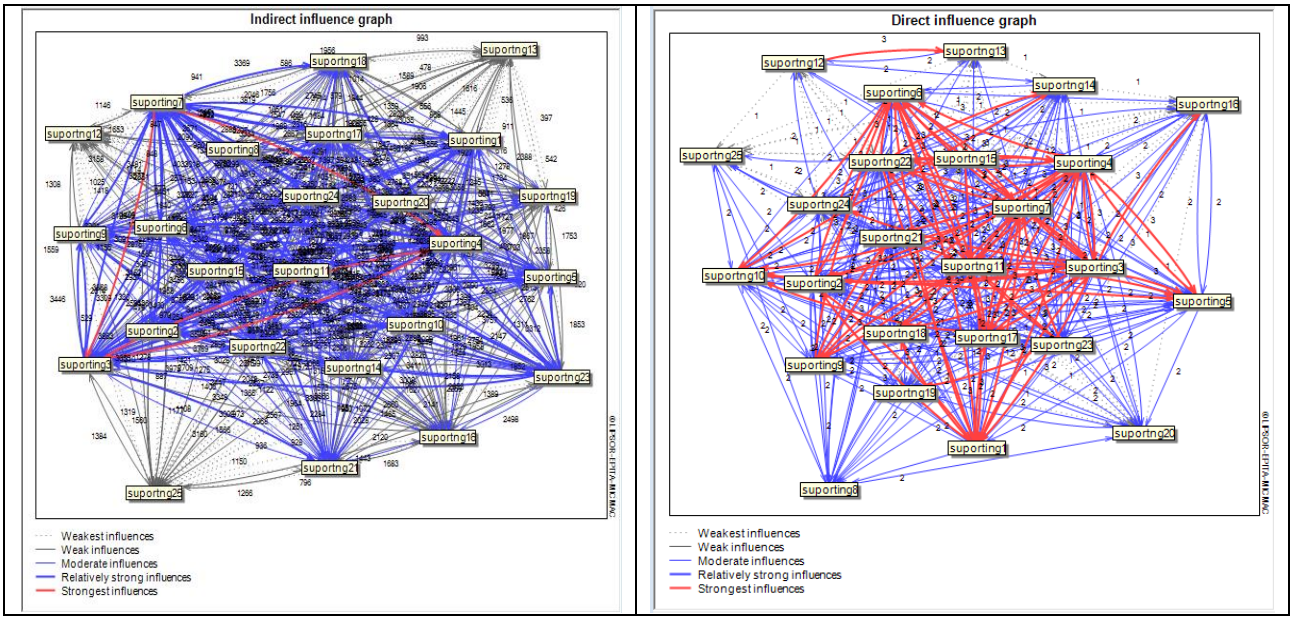
Table 3- Analysis of the direct and indirect effects of supportive policy factors on the economic resilience of rural households in the face of climate change

نوع متغیر Type of Variable	شاخص‌های مربوطه Related Indicators
متغیرهای تأثیرگذار Influential Variables	دسترسی به مؤسسات آموزش عالی در راستای تربیت نیروی انسانی متخصص(۱۵)
	Access to higher education institutions for training specialized human resources (15)
	سیاست‌گذاری با پتانسیل‌های منطقه در جهت عملیاتی کردن برنامه‌های توسعه(23)
	Policy-making based on regional potentials to implement development programs (23)
متغیرهای تأثیرپذیر Affected Variables	افزایش استفاده از سامانه اطلاعات کشاورزی در تدوین الگوی کشت محصولات (18)
	Increasing the use of agricultural information systems in developing crop pattern models (18)
	دسترسی به سامانه سلامت به‌منظور نوآوری در ارائه خدمات بهداشتی و درمانی(12)
	Access to the health system for innovation in health and medical services (12)
	افزایش دسترسی به مراقبت‌های ویژه برای سالمندان و گروه‌های خاص(13)
	Improving access to special care for the elderly and vulnerable groups (13)
متغیرهای مستقل (اهرمی) Independent (Leverage) Variables	افزایش روند استفاده از انرژی‌های پاک (سبز) و تجدیدپذیر در روستاها(19)
	Increasing the use of clean (green) and renewable energy in rural areas (19)
	افزایش توجه به مدیریت مصرف بهینه سوخت و انرژی در روستاها(20)
	Increasing attention to optimal fuel and energy consumption management in villages (20)
	سامانه‌های اطلاع‌رسانی خدمات به‌منظور شفافیت و آگاهی روستاییان(25)
	Service information systems for transparency and rural awareness (25)
متغیرهای دووجهی (ریسک) Bi-directional (Risk) Variables	دسترسی بهتر به بازارهای مالی برای محصولات تولیدی در برابر تغییرات اقلیمی(1)
	Better access to financial markets for production against climate change (1)
	افزایش درآمد فعالیت‌های وابسته به بخش کشاورزی نسبت به سایر بخش‌ها(3)
	income from agricultural-related activities compared to other sectors (3)
	افزایش سرمایه‌گذاری در روستا و تمایل بخش خصوصی به سرمایه‌گذاری در طرح‌ها4)
	Increased rural investment and private sector willingness to invest in projects (4)
	استفاده بهینه از فضای اینترنت در راستای هویت‌سازی و برندسازی(9)
	Optimal use of the Internet for identity building and branding (9)
	ایجاد زیرساخت‌های ارتباطی به‌منظور کاهش هزینه‌های مربوط به حمل‌ونقل(22)
	Creating communication infrastructure to reduce transportation-related costs (22)
	بهبود مدیریت هزینه‌ها به‌منظور پایداری مالی و اثربخشی محصولات تولیدی(2)
	Improving cost management for financial sustainability and production efficiency (2
	(توجه به دانش بومی روستاییان در هنگام مواجهه با تغییرات اقلیمی(5)
	Considering indigenous knowledge of villagers when facing climate change (5)
متغیرهای دووجهی (هدف) Bi-directional (Goal) Variables	امکان تنوع‌بخشی به منابع درآمدی و پس‌انداز در روستاها در برابر تغییرات اقلیمی(6)
	Possibility of diversifying income and savings sources in villages against climate change (6)
	افزایش روحیه کارآفرینی و راه‌اندازی کسب و کارهای جدید محلی(7)
	Enhancing entrepreneurial spirit and launching new local businesses (7)
	افزایش استفاده از تکنولوژی و بازاریابی الکترونیکی و فروش محصولات کشاورزی(17)
	Increasing the use of technology, e-marketing, and sale of agricultural products (17)
	ایجاد بستر مناسب برای افزایش دسترسی واحدهای مسکونی به اینترنت ثابت در روستا(21)
	Creating appropriate infrastructure to increase fixed internet access for rural households (21)
	به‌کارگیری فناوری اطلاعات و ارتباطات جهت دسترسی روستاییان به خدمات مدیریتی(24)
	Applying ICT to provide rural communities access to management services (24)
متغیرهای تنظیمی Regulatory Variables	تشویق مردم با استفاده از وام‌ها و اعتبارات جهت مقاوم‌سازی و نوسازی مسکن(8)
	Encouraging people through loans and credits for housing reinforcement and renovation (8)

مقدار تأثیری که تک‌تک عوامل بر یکدیگر می‌گذارند توسط مدل معادلات ساختاری (MICMAC) به توان‌های مختلف رسیده است که مجموع آن‌ها مقدار کمی تأثیرپذیری یا تأثیرگذاری را تشکیل می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده از نرم‌افزار میک‌مک شکل ۵ (الف) می‌توان گفت از ۲۵ عامل کلیدی مورد بررسی در بعد سیاست‌های حمایتی تاب‌آوری اقتصادی روستائیان در مواجهه با تغییرات اقلیمی در سه شهرستان ۸ عامل به‌عنوان پیشران کلیدی دارای بیشترین تأثیرگذاری بوده است که این پیشران‌ها به ترتیب رتبه عبارت‌اند از: حمایت دولت و دسترسی مناسب به امکانات پشتیبانی برای فعالیت‌های اقتصادی (۵۵)؛ افزایش سرمایه‌گذاری در روستا و تمایل بخش خصوصی به سرمایه‌گذاری در طرح‌ها (۵۳)؛ ایجاد زیرساخت‌های ارتباطی به منظور کاهش هزینه‌های مربوط به حمل‌ونقل (۵۳)؛ افزایش درآمد فعالیت‌های وابسته به بخش کشاورزی نسبت به سایر بخش‌ها(۵۲)، سیاست‌گذاری با پتانسیل‌های منطقه در جهت عملیاتی کردن برنامه‌های توسعه (۴۹)؛ امکان تنوع‌بخشی به منابع درآمدی پس‌انداز در روستاها در برابر تغییرات اقلیمی (۴۵)؛ افزایش روحیه کارآفرینی راه‌اندازی و ترویج کسب و کارهای جدید محلی (۴۵)؛ دسترسی بهتر به بازارهای مالی برای محصولات تولیدی در برابر تغییرات اقلیمی (۴۴). در تأثیرات غیرمستقیم؛ نرم‌افزار متغیرها را به توان‌های (۲، ۳، ۴، ۵، ۶،۷ و...) می‌رساند. شکل ۵ (ب) می‌توان گفت که بین عوامل مورد بررسی، متغیرهای افزایش درآمد فعالیت‌های وابسته به بخش کشاورزی نسبت به سایر بخش‌ها (۷/۳۲+E۰۴) ؛ افزایش سرمایه‌گذاری در روستا و تمایل بخش خصوصی به سرمایه‌گذاری در طرح‌ها (۷/۱۹+E۰۴) ، حمایت دولت و دسترسی مناسب به امکانات پشتیبانی برای فعالیت‌های اقتصادی (۶/۹۰+E۰۴) ؛ امکان تنوع بخشی به منابع درآمدی پس‌انداز در روستاها در برابر تغییرات اقلیمی (۶/۸۸+E۰۴)؛ بهبود مدیریت هزینه‌ها به منظور پایداری مالی و اثربخشی محصولات تولیدی (۶/۸۴+E۰۴)؛ افزایش روحیهٔ کارآفرینی راه‌اندازی و ترویج کسب و کارهای جدید محلی(۶/۶۷+E۰۴)؛ افزایش استفاده از تکنولوژی و بازاریابی الکترونیکی و فروش محصولات کشاورزی (۶/۵۵+E۰۴) و دسترسی بهتر به بازارهای مالی برای محصولات تولیدی در برابر تغییرات اقلیمی (۶/۳۸+E۰۴) به ترتیب دارای بیشترین میزان تأثیرگذاری غیرمستقیم نسبت به سایر متغیرها و دارای بیشترین ارزش ستونی محاسبه‌شده را در بین سایر عوامل کلیدی دارند.

با توجه به نتایج به دست آمده از ماتریس تأثیرگذاری مستقیم / غیرمستقیم شکل ۶ که به رتبه‌بندی عوامل کلیدی پرداخته است با توجه به نتایج حاصله می‌توان بیان کرد که حمایت دولت و دسترسی مناسب به امکانات پشتیبانی برای فعالیت‌های اقتصادی؛ افزایش سرمایه‌گذاری در روستا و تمایل بخش خصوصی به سرمایه‌گذاری در طرح‌ها؛ ایجاد زیرساخت‌های ارتباطی به منظور کاهش هزینه‌های مربوط به حمل‌ونقل؛ افزایش درآمد فعالیت‌های وابسته به بخش کشاورزی نسبت به سایر بخش‌ها و سیاست‌گذاری با پتانسیل‌های منطقه در جهت عملیاتی کردن برنامه‌های توسعه به ترتیب در رتبهٔ اول تا پنجم تأثیرگذاری مستقیم سمت چپ شکل ۶ و تأثیرگذاری غیرمستقیم سمت راست شکل ۶ قرارگرفته‌اند و بیشترین سهم را در بعد سیاست‌های حمایتی تاب‌آوری اقتصادی روستائیان در مواجهه با تغییرات اقلیمی در سه شهرستان داشته‌اند.

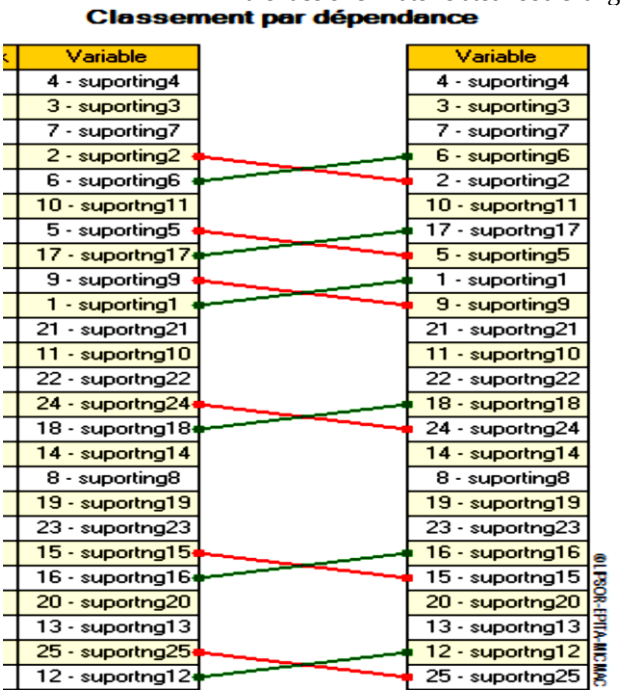
با توجه به نتایج به دست آمده از ماتریس تأثیرپذیری (وابستگی) مستقیم / غیرمستقیم شکل ۷ که به رتبه‌بندی عوامل کلیدی پرداخته است با توجه به نتایج حاصله می‌توان بیان کرد که افزایش سرمایه‌گذاری در روستا و تمایل بخش خصوصی به سرمایه‌گذاری در طرح‌ها؛ افزایش درآمد فعالیت‌های وابسته به بخش کشاورزی نسبت به سایر بخش‌ها؛ حمایت دولت و دسترسی مناسب به امکانات پشتیبانی برای فعالیت‌های اقتصادی؛ بهبود مدیریت هزینه‌ها به‌منظور پایداری مالی و اثربخشی محصولات تولیدی و امکان تنوع‌بخشی به منابع درآمدی پس‌انداز در روستاها در برابر تغییرات اقلیمی به ترتیب در رتبه اول تا پنجم تأثیرپذیری (وابستگی) مستقیم سمت چپ شکل ۷ و همچنین در سمت راست شکل ۷ تأثیرپذیری (وابستگی) غیرمستقیم قرارگرفته‌اند و بیشترین سهم را در بعد سیاست‌های حمایتی تاب‌آوری اقتصادی روستائیان در مواجهه با تغییرات اقلیمی در سه شهرستان داشته‌اند.



الف: تأثیرات مستقیم **ب: تأثیرات غیرمستقیم**

شکل ۵- تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم عوامل کلیدی بعد سیاست‌های حمایتی تاب‌آوری اقتصادی روستائیان در مواجهه با تغییرات اقلیمی غذایی (تأثیرات بسیار ضعیف تا بسیار قوی)

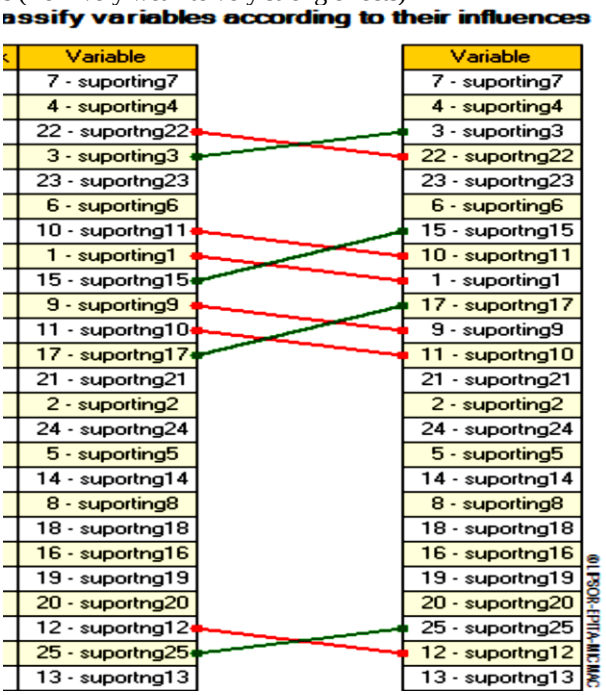
Fig.5. Direct and indirect effects of key factors following supportive policies for the economic resilience of rural households in the face of climate-related food changes (from very weak to very strong effects)



مستقیم سمت (چپ) غیر مستیم سمت (راست)

شکل ۷- رتبه‌بندی متغیرها بر اساس میزان وابستگی

Fig.6. Ranking of Variables Based on Their Impact Level Dependence



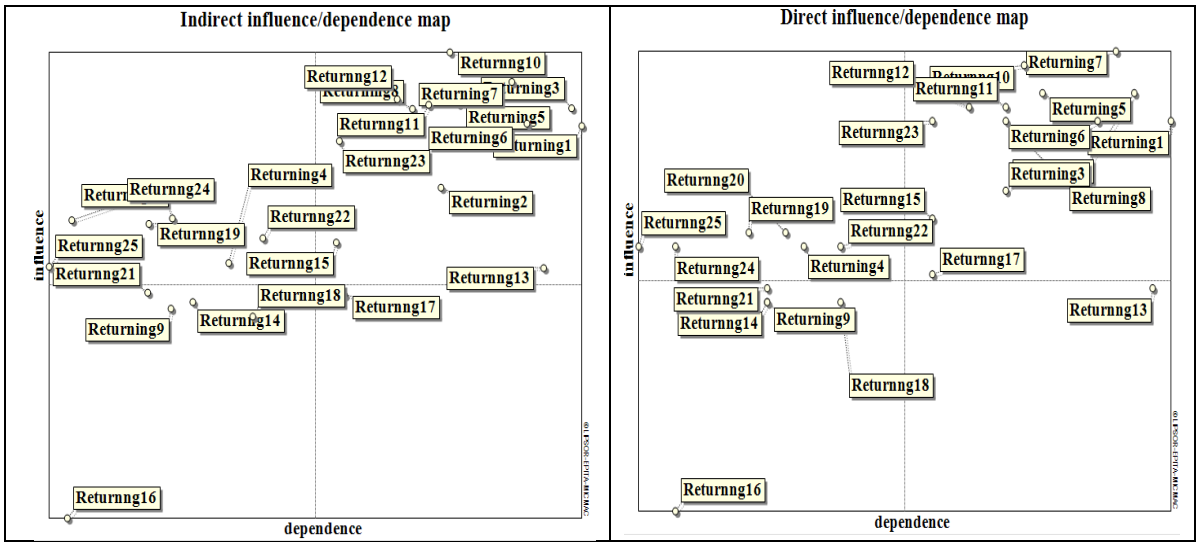
مستقیم سمت (چپ) غیر مستیم سمت (راست)

شکل ۶- رتبه‌بندی متغیرها بر اساس میزان اثرگذاری

Fig.7. Ranking of variables based on their level of influence

پیشران‌های کلیدی اثرگذاری مؤلفه‌های بازگشت به شرایط مناسب تاب‌آوری اقتصادی روستائیان بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی در منطقه

با توجه به نقش پراکندگی خروجی شکل ۸ تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم مؤلفه‌های بازگشت به شرایط مناسب تاب‌آوری اقتصادی روستائیان از ۲۵ عامل کلیدی تشکیل‌شده است. همچنین در بررسی اثرات غیرمستقیم مطابق شکل ۸ (ب) بیشترین توزیع پراکندگی شاخص‌ها را به ترتیب متغیرهای دووجهی ریسک (۱۳) عامل و متغیرهای تأثیرگذار (۶) عامل، کم تأثیر (مستقل) ۵ عامل و تأثیرپذیر ۱ عامل تشکیل می‌دهند (جدول ۴).



الف: تأثیرات مستقیم ب: تأثیرات غیرمستقیم

شکل ۸- تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم مؤلفه‌های بازگشت به شرایط مناسب تاب‌آوری اقتصادی روستائیان بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی در منطقه

Fig.8. Direct and indirect effects of the components influencing the recovery of rural economic resilience after exposure to climate change in the study area

با توجه به نتایج به دست آمده از نرم‌افزار میک‌مک شکل ۹ (الف) می‌توان گفت از ۲۵ عامل کلیدی مورد بررسی در روند بازگشت به شرایط مناسب تاب‌آوری اقتصادی روستائیان بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی شش عامل به‌عنوان پیشران کلیدی دارای بیشترین تأثیرگذاری بوده است که این پیشران‌ها به ترتیب رتبه عبارت‌اند از: داشتن درآمد جایگزین و بهره‌مندی از منابع جدید درآمدی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی (۴۱)؛ توانایی بازیابی شغل مناسب و افزایش نوآوری در فعالیت‌های اقتصادی (بازاریابی جدید و غیره) بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی (۴۰)؛ توانایی ایجاد و توسعه کسب وکار از طریق تنوع بخشی فعالیت‌های غیر زراعی بعد از وقوع بحران (۳۸)؛ میزان استفاده از کمک‌های دولت به آسیب دیدگان روستایی بعد از وقوع بحران (۳۸)؛ توجه به روند کاهش فقر در بین خانوارهای روستایی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی (۳۷)؛ افزایش دسترسی به سامانه‌های هوشمند برای انجام فعالیت‌های اقتصادی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی (۳۷)؛ این متغیرها اکثراً به‌عنوان متغیرهای دو وجهی بودند که دارای بیشترین تأثیرگذاری و کمترین تأثیرپذیری را در بین عوامل کلیدی داشته‌اند. در تأثیرات غیرمستقیم؛ نرم‌افزار متغیرها را به توان‌های (۲، ۳، ۴، ۵، ۶،۷ و...) می‌رساند.

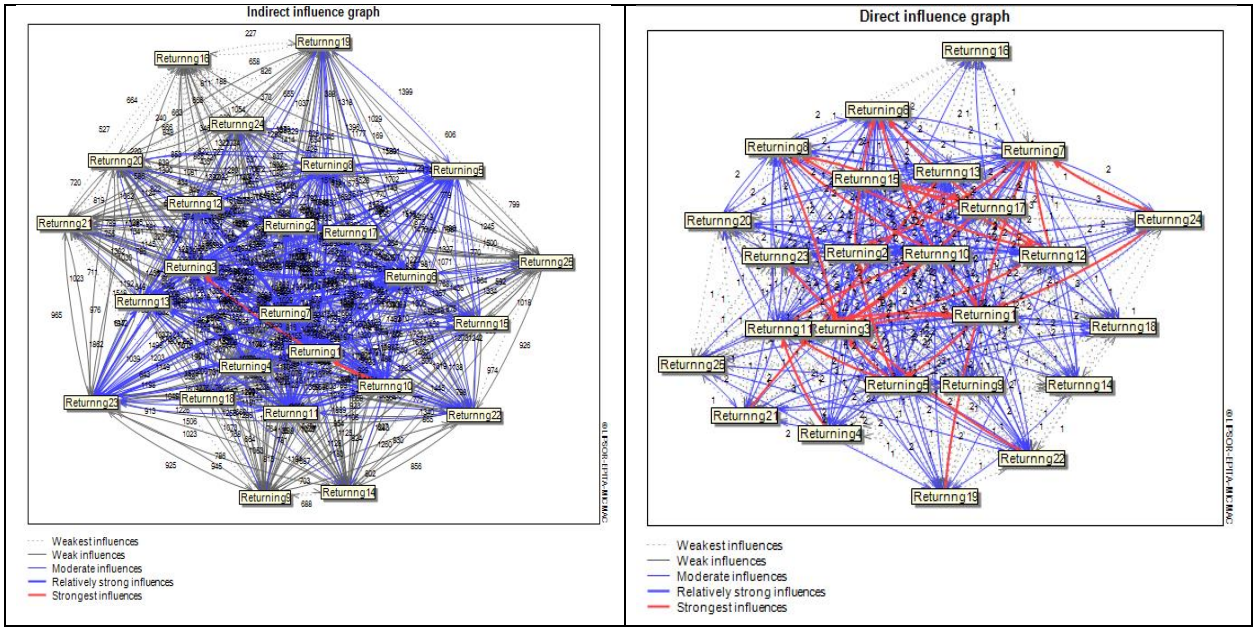
جدول ۴- تحلیل وضعیت اثرگذاری مستقیم و غیرمستقیم عوامل مؤلفه‌های بازگشت به شرایط مناسب تاب‌آوری اقتصادی روستائیان بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی در منطقه

Table 4- Analysis of the direct and indirect effects of the components influencing the recovery of rural economic resilience after exposure to climate change in the study area

نوع متغیر Type of Variable	شاخص‌های مربوطه Related Indicators
متغیرهای تأثیرگذار Influential Variables	کاهش مالیات سررسید پرداخت تسهیلات اعطایی بعد از وقوع بحران(3) Reduction of tax deadlines for granted facilities after the crisis (3) توجه به توسعه زیرساخت‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات(ICT) (19) Attention to the development of information and communication technology infrastructure (ICT) (19) افزایش میزان فعالیت فشرده کشاورزی و غیرکشاورزی در روستاها(20) Increase in intensive agricultural and non-agricultural activities in villages (20) میزان استفاده روستاییان از حمایت مالی اقوام و خویشان خارج از روستا(24) The extent of villagers' use of financial support from relatives outside the village (24) افزایش نظارت بر ساخت‌وسازها توسط دهیاری برای هدایت توسعه فیزیکی(25) Increased supervision of construction by rural management to guide physical development (25)
متغیرهای تأثیرپذیر Affected Variables	ارتقاء رضایت‌مندی از زیست‌پذیری در سکونتگاه‌های روستایی(13) Enhancement of satisfaction with livability in rural settlements (13)
متغیرهای مستقل (اهرمی) Independent (Leverage) Variables	روند افزایش دسترسی به آب تصفیه‌شده و قابل شرب در روستاها(9) Increasing access to purified and potable water in rural areas (9) زمینه‌سازی برای یادگیری زبان‌های خارجی به‌منظور بهره‌مندی از بسترهای ارتباطی(14) Creating opportunities for learning foreign languages to benefit from communication platforms (14) کاهش مصرف مواد شیمیایی و استفاده از کمپوست در جهت حفاظت از اراضی(16) Reducing chemical use and promoting compost to protect farmlands (16) افزایش جذابیت و رفاه در مسکن با هدف سرپناه امن و اساسی در روستاها(21) Enhancing housing attractiveness and welfare for secure and essential rural shelter (21)
متغیرهای دووجهی (ریسک) Bi-directional (Risk) Variables	میزان استفاده از کمک‌های دولت به آسیب‌دیدگان روستایی بعد از وقوع بحران(5) The level of rural victims' use of government aid after crises (5) دسترسی به شغل مناسب در روستا و شهرهای پیرامون و ایجاد فرصت‌های متنوع(7) Access to suitable jobs in villages and surrounding towns and creation of diverse opportunities (7) افزایش مبادلات مالی فرامحلی با تقویت جریان‌ها و پیوندهای روستا-شهری(8) Increasing interregional financial exchanges by strengthening rural-urban linkages (8) توانایی بازیابی شغل مناسب و افزایش نوآوری در فعالیت‌های اقتصادی(10) Ability to regain suitable jobs and enhance innovation in economic activities (10) توجه به روند کاهش فقر در بین خانوارهای روستایی(11) Attention to poverty reduction trends among rural households (11) افزایش دسترسی به سامانه‌های هوشمند برای انجام فعالیت‌های اقتصادی(12) Improving access to smart systems for conducting economic activities (12) زمینه‌سازی برای حضور نخبگان و اتاق‌های فکر برای اداره امور(23) Facilitating the presence of elites and think tanks for governance (23)
متغیرهای دووجهی (هدف) Bi-directional (Goal) Variables	توانمندسازی مالی برای جبران خسارات ناشی از بحران تغییرات اقلیمی(1) Financial empowerment to compensate for damages caused by climate change crises (1) اعطای وام و تسهیلات به آسیب‌دیدگان از مخاطرات اقلیمی(2) Providing loans and facilities to those affected by climatic hazards (2) درآمد جایگزین و بهره‌مندی از منابع جدید درآمدی(6) Alternative income and benefit from new income sources (6)
متغیرهای تنظیمی Regulatory Variables	افزایش بهره‌گیری از شیوه‌های آبیاری هوشمند و کنترل از راه دور(15) Enhancing the use of smart and remote irrigation methods (15) توجه به ظرفیت‌های کشاورزی هوشمند در هنگام مواجهه روستاییان با تغییرات اقلیمی(17) Considering smart agricultural capacities when villagers face climate change (17) افزایش روند استفاده از انرژی‌های پاک (سبز) و تجدیدپذیر در روستاها(18)

Increasing the use of clean (green) and renewable energy in villages (18)
توجه به خصوصیات مدیریتی و تخصص در انتخاب شورا و دهیار(22)
Considering managerial and professional characteristics in selecting village councils and chiefs (22)

شکل ۹ (ب) می‌توان گفت که بین عوامل مورد بررسی متغیرهای کاهش مصرف مواد شیمیایی و استفاده از کمپوست در جهت حفاظت از اراضی آب‌وخاک در روستاها بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی (۷/۸۸+E۰۴)، توانایی بازیابی شغل مناسب و افزایش نوآوری در فعالیت‌های اقتصادی (بازاریابی جدید و غیره) بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی (۴/۰۵+E۰۴)، داشتن درآمد جایگزین و بهره‌مندی از منابع جدید درآمدی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی (۳/۸۴+E۰۴)، افزایش دسترسی به سامانه‌های هوشمند برای انجام فعالیت‌های اقتصادی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی (۳/۷۲+E۰۴)، و میزان استفاده از کمک‌های دولت به آسیب دیدگان روستایی بعد از وقوع بحران (۳/۶۹+E۰۴) به ترتیب دارای بیشترین میزان تأثیرگذاری غیرمستقیم بر سایر متغیرها و دارای بیشترین ارزش ستونی محاسبه شده را در بین سایر عوامل کلیدی دارند.



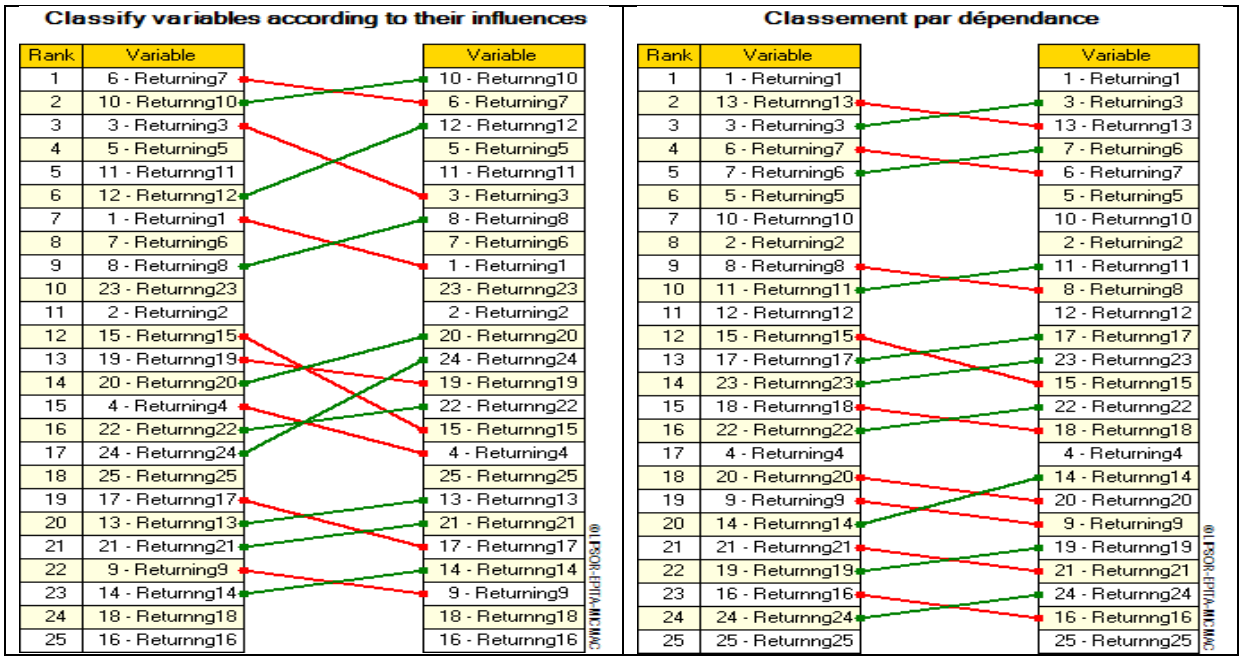
الف: تأثیرات مستقیم **ب: تأثیرات غیرمستقیم**

شکل ۹– تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم عوامل کلیدی بازگشت به شرایط مناسب تاب‌آوری اقتصادی روستائیان بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی در منطقه (تأثیرات بسیار ضعیف تا بسیار قوی)

Fig.9. Direct and indirect effects of key factors on the recovery of rural economic resilience after exposure to climate change in the study area (from very weak to very strong effects)

با توجه به نتایج به دست آمده از ماتریس تأثیرگذاری مستقیم / غیرمستقیم شکل ۱۰ که به رتبه‌بندی عوامل کلیدی پرداخته است با توجه به نتایج حاصله می‌توان بیان کرد افزایش توانمندسازی مالی مردم برای جبران خسارت‌های ناشی از بحران تغییرات اقلیمی؛ ارتقاء رضایت‌مندی از زیست‌پذیری در سکونتگاه‌های روستایی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی؛ توانایی ایجاد و توسعه کسب و کار از طریق تنوع بخشی فعالیت‌های غیر زراعی بعد از وقوع بحران؛ داشتن درآمد جایگزین و بهره‌مندی از منابع جدید درآمدی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی و دسترسی به شغل مناسب در روستا و شهرهای پیرامون و ایجاد فرصت‌های متنوع شغلی در آینده بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی به ترتیب در رتبه اول تا پنجم تأثیرگذاری مستقیم سمت چپ شکل ۱۰ قرارگرفته‌اند و بیشترین سهم را در روند بازگشت به شرایط مناسب تاب‌آوری اقتصادی روستائیان بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی سه شهرستان داشته‌اند. همچنین در سمت راست شکل ۱۰ عواملی که بیشترین تأثیرگذاری غیرمستقیم را داشته‌اند می‌توان به افزایش توانمندسازی مالی مردم برای جبران خسارت‌های ناشی از بحران تغییرات اقلیمی؛ توانایی ایجاد و توسعه کسب و

کار از طریق تنوع بخشی فعالیت‌های غیر زراعی بعد از وقوع بحران؛ ارتقاء رضایت‌مندی از زیست‌پذیری در سکونتگاه‌های روستایی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی؛ دسترسی به شغل مناسب در روستا و شهرهای پیرامون و ایجاد فرصت‌های متنوع شغلی در آینده بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی و داشتن درآمد جایگزین و بهره‌مندی از منابع جدید درآمدی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی که به ترتیب در رتبه اول تا پنجم قرار دارند اشاره کرد.



مستقیم سمت (چپ) غیر مستیم سمت (راست)

شکل ۱۰– رتبه‌بندی متغیرها بر اساس میزان اثرگذاری

Fig.11. Ranking of Variables Based on Their Level of influence

مستقیم سمت (چپ) غیر مستیم سمت (راست)

شکل ۱۱– رتبه‌بندی متغیرها بر اساس میزان وابستگی

Fig.10. Ranking of Variables Based on Their Impact Level Dependence

با توجه به نتایج به دست آمده از ماتریس تأثیرپذیری (وابستگی) مستقیم / غیرمستقیم شکل ۱۱ که به رتبه‌بندی عوامل کلیدی روند بازگشت به شرایط مناسب تاب‌آوری اقتصادی روستائیان بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی پرداخته است با توجه به نتایج حاصله می‌توان بیان کرد که داشتن درآمد جایگزین و بهره‌مندی از منابع جدید درآمدی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی؛ توانایی بازیابی شغل مناسب و افزایش نوآوری در فعالیت‌های اقتصادی (بازاریابی جدید و غیره) بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی؛ توانایی ایجاد و توسعه کسب و کار از طریق تنوع بخشی فعالیت‌های غیر زراعی بعد از وقوع بحران؛ میزان استفاده از کمک‌های دولت به آسیب دیدگان روستایی بعد از وقوع بحران و توجه به روند کاهش فقر در بین خانوارهای روستایی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی به ترتیب در رتبه اول تا پنجم تأثیرپذیری (وابستگی) مستقیم سمت چپ شکل ۱۱ قرارگرفته‌اند و بیشترین سهم را در روند بازگشت به شرایط مناسب تاب‌آوری اقتصادی روستائیان بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی در سه شهرستان داشته‌اند. همچنین در سمت راست شکل۱۱ عواملی که بیشترین تأثیرپذیری (وابستگی) غیرمستقیم را در روند بازگشت به شرایط مناسب تاب‌آوری اقتصادی روستائیان بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی داشته‌اند می‌توان به توانایی بازیابی شغل مناسب و افزایش نوآوری در فعالیت‌های اقتصادی (بازاریابی جدید و غیره) بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی؛ داشتن درآمد جایگزین و بهره‌مندی از منابع جدید درآمدی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی؛ افزایش دسترسی به سامانه‌های هوشمند برای انجام فعالیت‌های اقتصادی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی؛ میزان استفاده از کمک‌های دولت به آسیب دیدگان روستایی بعد از وقوع بحران و توجه به روند کاهش فقر در بین خانوارهای روستایی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی اشاره کرد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف شناسایی عوامل کلیدی و پیشران‌های اثرات هوشمندسازی بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی در سه شهرستان فردوس، سرایان و بشرویه انجام‌شده است. برای دستیابی به این هدف، ابتدا ۲۵ نفر از متخصصان و کارشناسان آگاه در حوزه هوشمندسازی روستا، تاب‌آوری اقتصادی و تغییرات اقلیمی به‌عنوان نمونه پژوهش انتخاب شدند. سپس با بهره‌گیری از روش دلفی و از طریق پرسشنامه‌ای طراحی‌شده در دو بعد اصلی شامل «سیاست‌های حمایتی تاب‌آوری اقتصادی» و «سیاست‌های بازگشت به شرایط مناسب پس از مواجهه با تغییرات اقلیمی»، به ارزیابی و امتیازدهی شاخص‌های مؤثر پرداخته شد. درمجموع، ۵۰ شاخص در این دو بعد شناسایی و در قالب ماتریس تأثیرات متقاطع تنظیم گردید. در گام بعد، با استفاده از نرم‌افزار MICMAC، شدت تأثیرگذاری و تأثیرپذیری مستقیم و غیرمستقیم شاخص‌ها تحلیل و وزن‌دهی شد. نتایج حاصل، منجر به شناسایی ۱۶ پیشران کلیدی به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای مؤثر در تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی شد (جدول ۵).

جدول ۵- پیشران‌های کلیدی اثرات هوشمندسازی بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی

Table 5- Key drivers of the impacts of smart technologies on the economic resilience of rural households in the face of climate change

ابعاد Dimension	رتبه Rank	پیشران کلیدی Key Driver	اثرگذاری مستقیم Direct Impact	اثرگذاری غیرمستقیم Indirect Impact
سیاست‌های حمایتی تاب‌آوری اقتصادی روستائیان در مواجهه با تغییرات اقلیمی Supportive Policies for Rural Economic Resilience in Facing Climate Change	1	دسترسی بهتر به بازارهای مالی برای محصولات تولیدی در برابر تغییرات اقلیمی Better access to financial markets for production under climate change	44	6.76E+04
	2	افزایش درآمد فعالیت‌های وابسته به بخش کشاورزی نسبت به سایر بخش‌ها Increase in income from agriculture-related activities compared to other sectors	53	7.95E+04
	3	افزایش فرصت‌های سرمایه‌گذاری در روستا و تمایل بخش خصوصی شهری به سرمایه‌گذاری در طرح‌ها Increasing rural investment opportunities and private sector willingness to invest in projects	52	7.84E+04
	4	حمایت دولت و دسترسی مناسب به امکانات پشتیبانی برای فعالیت‌های اقتصادی در برابر تغییرات اقلیمی Government support and access to facilities for economic activities under climate change	55	8.14E+04
	5	استفاده بهینه از فضای اینترنت در راستای هویت‌سازی و برندسازی برای تقویت اقتصاد روستا Optimal use of the internet for identity building and branding to strengthen rural economy,	43	6.42E+04
	6	افزایش روحیه کارآفرینی و راه‌اندازی کسب و کارهای جدید محلی در مواجهه با تغییرات اقلیمی Enhancing entrepreneurial spirit and launching new local businesses under climate change	45	6.83E+04
	7	حمایت از افراد تحصیل‌کرده و افزایش تمایل به ماندگاری در روستاها در مواجهه با تغییرات اقلیمی Supporting educated individuals and encouraging rural retention under climate change	42	6.23E+04
	8	افزایش استفاده از تکنولوژی، بازاریابی الکترونیکی و فروش محصولات کشاورزی در مواجهه با تغییرات اقلیمی Increasing the use of technology, e-marketing, and sales of agricultural products under climate change	42	6.64E+04
بازگشت به شرایط مناسب تاب‌آوری اقتصادی روستائیان بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی Returning to Favorable	1	اعطای وام و تسهیلات به آسیب دیدگان از مخاطرات اقلیمی در جهت بازیابی فعالیت‌های اقتصادی Providing loans and facilities to climate-affected people for economic activity recovery	35	3.10E+04
	2	توانایی ایجاد و توسعه کسب و کار از طریق تنوع‌بخشی فعالیت‌های غیر زراعی بعد از وقوع بحران Ability to create and expand businesses through non-agricultural diversification after crisis	42	3.66E+04
	3	میزان استفاده از کمک‌های دولت به آسیب دیدگان روستایی بعد از وقوع بحران Extent of use of government aid by rural disaster victims	38	3.69E+04
	4	دسترسی به شغل مناسب در روستا و شهرهای پیرامون و ایجاد فرصت‌های متنوع شغلی بعد از مواجهه با تغییرات Access to suitable jobs in rural and surrounding urban areas and creating diverse job opportunities after climate change	40	3.66E+04

Economic Resilience Conditions for Rural Areas After Climate Change	5	افزایش مبادلات مالی فرامحلی با تقویت جریان‌ها و پیوندهای روستا-شهری بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی Increasing interregional financial exchanges by strengthening rural-urban linkages after climate change	36	3.69E+04
	6	توانایی بازیابی شغل مناسب و افزایش نوآوری در فعالیت‌های اقتصادی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی Ability to recover suitable jobs and increase innovation in economic activities after change	40	4.05E+04
	7	توجه به روند کاهش فقر در بین خانوارهای روستایی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی Attention to poverty reduction trends among rural households after climate change	37	3.68E+04
	8	افزایش دسترسی به سامانه‌های هوشمند برای انجام فعالیت‌های اقتصادی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی Increasing access to smart systems for conducting economic activities after climate change	37	3.72E+04

نتایج پژوهش نشان داد که در بعد سیاست‌های حمایتی تاب‌آوری اقتصادی روستائیان در مواجهه با تغییرات اقلیمی دسترسی بهتر به بازارهای مالی برای محصولات تولیدی در برابر تغییرات اقلیمی (۴۴)؛ افزایش درآمد فعالیت‌های وابسته به بخش کشاورزی نسبت به سایر بخش‌ها (۵۳)؛ افزایش فرصت‌های سرمایه‌گذاری در روستا و تمایل بخش خصوصی شهری به سرمایه‌گذاری در طرح‌ها (۵۲)؛ حمایت دولت و دسترسی مناسب به امکانات پشتیبانی برای فعالیت‌های اقتصادی در روستاها در برابر تغییرات اقلیمی(۵۵)؛ استفاده بهینه از فضای اینترنت در راستای هویت‌سازی و برندسازی برای تقویت اقتصاد روستا به‌ویژه در گردشگری (۴۳)؛ افزایش روحیه کارآفرینی راه‌اندازی و ترویج کسب و کارهای جدید محلی در مواجهه با تغییرات اقلیمی (۴۵)؛ حمایت از افراد تحصیل‌کرده و افزایش تمایل به ماندگاری در روستاها در مواجهه با تغییرات اقلیمی (۴۲)؛ افزایش استفاده از تکنولوژی و بازاریابی الکترونیکی و فروش محصولات کشاورزی در مواجهه با تغییرات اقلیمی (۴۲) و در بعد سیاست‌های بازگشت به شرایط مناسب تاب‌آوری اقتصادی روستائیان بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی متغیرهای اعطای وام و تسهیلات به آسیب دیدگان از مخاطرات اقلیمی در جهت بازیابی فعالیت‌های اقتصادی (۳۵)؛ توانایی ایجاد و توسعه کسب و کار از طریق تنوع بخشی فعالیت‌های غیر زراعی بعد از وقوع بحران (۴۲)؛ میزان استفاده از کمک‌های دولت به آسیب دیدگان روستایی بعد از وقوع بحران (۳۸)؛ دسترسی به شغل مناسب در روستا و شهرهای پیرامون و ایجاد فرصت‌های متنوع شغلی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی (۴۰)؛ افزایش مبادلات مالی فرامحلی با تقویت جریان‌ها و پیوندهای روستا شهری بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی (۳۶)؛ توانایی بازیابی شغل مناسب و افزایش نوآوری در فعالیت‌های اقتصادی (بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی(۴۰)؛ توجه به روند کاهش فقر در بین خانوارهای روستایی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی (۳۷) و افزایش دسترسی به سامانه‌های هوشمند برای انجام فعالیت‌های اقتصادی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی (۳۷) این متغیرها اکثراً به‌عنوان متغیرهای دو وجهی بودند دارای بیشترین تأثیرگذاری و کمترین تأثیرپذیری را در بین عوامل کلیدی داشته‌اند.

بنابراین؛ این مطالعه به دنبال عوامل کلیدی و پیشران‌های اصلی اثرات هوشمندسازی بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی در سه شهرستان (فردوس، بشرویه و سراوان) می‌باشد بنابراین، این مقاله شاخص‌های مؤثر و ضروری اثرات هوشمندسازی بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی را در روستاهای سه شهرستان مذکور مورد بررسی قرار می‌دهد. در نهایت، نتایج تأثیر مثبت اثرات هوشمندسازی را بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی را تأیید می‌کند.

یافته‌های به دست آمده نشان می‌دهد با هوشمندسازی روستاها تاب‌آوری اقتصادی روستاها در برابر تغییرات اقلیمی بهبود می‌یابد. مطالعات گذشته، اثرات هوشمندسازی روستاها را بر تاب‌آوری اقتصادی در مواجهه با تغییرات اقلیمی را بدون در نظر گرفتن عوامل کلیدی و پیشران‌های اصلی بررسی کرده است. بااین‌حال، برتری این پژوهش نسبت به سایر مطالعات این است که این مطالعه عوامل کلیدی و پیشران‌های اصلی اثرات هوشمندسازی بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی را مورد سنجش قرار می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که که در بعد سیاست‌های حمایتی تاب‌آوری اقتصادی روستائیان در مواجهه با تغییرات اقلیمی دسترسی بهتر به بازارهای مالی برای محصولات تولیدی در برابر تغییرات اقلیمی (۴۴)؛ افزایش درآمد فعالیت‌های وابسته به بخش کشاورزی نسبت به سایر بخشها (۵۳)؛ افزایش فرصت‌های سرمایه‌گذاری در روستا و تمایل بخش خصوصی شهری به سرمایه‌گذاری در طرح‌ها (۵۲)؛ حمایت دولت و دسترسی مناسب به امکانات پشتیبانی برای فعالیت‌های اقتصادی در روستاها در برابر تغییرات اقلیمی(۵۵)؛ استفاده بهینه از فضای اینترنت در راستای هویت‌سازی

و برندسازی برای تقویت اقتصاد روستا بویژه در گردشگری (۴۳)؛ افزایش روحیه کارآفرینی راه‌اندازی و ترویج کسب و کارهای جدید محلی در مواجهه با تغییرات اقلیمی (۴۵)؛ حمایت از افراد تحصیل‌کرده و افزایش تمایل به ماندگاری در روستاها در مواجهه با تغییرات اقلیمی (۴۲)؛ افزایش استفاده از تکنولوژی و بازاریابی الکترونیکی و فروش محصولات کشاورزی در مواجهه با تغییرات اقلیمی (۴۲) با نتایج تحقیق اللا و اندری (Ella & Andari, 2018)، عنابستانی و کلاته میمری (Anabestani & Kalateh Meymari, 2020) و عنابستانی و همکاران (Anabestani et al., 2022) همخوانی دارد و در بعد سیاست‌های بازگشت به شرایط مناسب تاب‌آوری اقتصادی روستائیان بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی متغیرهای اعطای وام و تسهیلات به آسیب دیدگان از مخاطرات اقلیمی در جهت بازیابی فعالیت‌های اقتصادی (۳۵)؛ توانایی ایجاد و توسعه کسب و کار از طریق تنوع بخشی فعالیت‌های غیر زراعی بعد از وقوع بحران (۴۲)؛ میزان استفاده از کمک‌های دولت به آسیب دیدگان روستایی بعد از وقوع بحران (۳۸)؛ دسترسی به شغل مناسب در روستا و شهرهای پیرامون و ایجاد فرصت‌های متنوع شغلی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی (۴۰)؛ افزایش مبادلات مالی فرامحلی با تقویت جریان‌ها و پیوندهای روستا شهری بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی (۳۶)؛ توانایی بازیابی شغل مناسب و افزایش نوآوری در فعالیت‌های اقتصادی (بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی (۴۰)؛ توجه به روند کاهش فقر در بین خانوارهای روستایی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی (۳۷) و افزایش دسترسی به سامانه‌های هوشمند برای انجام فعالیت‌های اقتصادی بعد از مواجهه با تغییرات اقلیمی (۳۷) با نتایج پژوهش‌های عنابستانی و همکاران (Anabestani et al., 2022)، عنابستانی و جوانشیری (Anabestani & Javanshiri, 2016)؛ عنابستانی و همکاران (Anabestani et al., 2022; Anabestani et al., 2023)، عنابستانی و کلاته میری (Anabestani & Kalateh Meymari, 2022) و نوروزی (Norouzi, 2021) همخوانی دارد.

References

Abebaw, D., Admassie, A., Kassa, H., & Padoch, C. (2020). Can rural outmigration improve household food security? Empirical evidence from Ethiopia. *World Development*, *129*, 104879. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.104879

Adamowicz, M., & Zwolińska-Ligaj, M. (2020). The "Smart Village" as a way to achieve sustainable development in rural areas of Poland. *Sustainability*, *12*(16), 6503. https://doi.org/10.3390/su12166503

Akhgari, M., & Ghasemian Moghaddam, A. (2023). Prioritization of Factors Affecting the Economic Resilience of Rural Households Against Drought (Case Study: Dastgerdan District, Tabas County). *Village and Sustainable Spatial Development*, *4*(2), 112–129. [in Persian] https://doi.org/10.22077/vssd.2023.5530.1121

Alam, G. M., Alam, K., Mushtaq, S., & Leal Filho, W. (2018). How do climate change and associated hazards impact on the resilience of riparian rural communities in Bangladesh? Policy implications for livelihood development. *Environmental Science & Policy*, *84*, 7-18. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.02.012

Anabestani, A., & Javanshiri, M. (2016). Analysis of Smart Rural Development Indicators (Case Study: Villages of Binalood County). *Journal of Rural Research and Planning*, *5*(4), 187–212. [in Persian] https://doi.org/10.22067/jrrp.v5i4.61113

Anabestani, A., & Kalateh Meymari, R. (2022). Investigating Key Drivers in the Formation of Smart Rural Development Using the Schwartz Qualitative Model (Case Study: Joveyn County). *Mountainous Areas Geographical Studies Quarterly*, *3*(1), 1–23. [in Persian] https://gsma.lu.ac.ir/article_707833.html

Anabestani, A., & Meymari, R. K. (2020). Analysis of key propellants affecting the formation of smart rural development in Iran. *Journal of Rural and Community Development*, *15*(4). [in Persian] https://journals.brandonu.ca/jrcd/issue/view/50

Anabestani, A., Bahadori Amjaz, F. L., & Tavakolinia, J. (2021). Spatial Analysis of Factors Influencing Smart Growth in Rural Settlements (Case Study: Jiroft County). *Spatial Economy and Rural Development*, *11*(1), 87–110. [in Persian] http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222131.1401.11.39.4.7

Anabestani, A., Bahadori Amjaz, F. L., & Tavakolinia, J. (2022). Explaining the Impact Scenarios of the Smart Growth Approach on the Sustainability of Rural Settlements (Case Study: Jiroft County). *Geography and Development*, *21*(71), 26–54. [in Persian] https://doi.org/10.22111/gdij.2023.7589

Anabestani, A., Bahadori Amjaz, F. L., & Tavakolinia, J. (2022). Analyzing the Key Drivers of the Effect of Smart Growth Approach on Sustainable Development of Iranian Rural Settlements. *Journal of Research and Rural Planning*, *11*(3), 91-113. [in Persian] https://doi.org/10.22067/jrrp.v11i3.2208.1059

Anabestani, A., Zolfaghari, M., & Tavakolinia, J. (2023). Analysis of the Impact of the Smart Village Approach on the Sustainability of Peri-Urban Settlements (Case Study: Villages Surrounding Tehran Metropolis). *Spatial Economy and Rural Development*, *12*(4), 39–64. [in Persian] http://dx.doi.org/10.61186/serd.12.46.39

Anabestani, A., Zolfaghari, M., & Tavakolinia, J. (2023). Development of impactful scenarios for smart village approaches on the sustainability of peri-urban settlements of the Metropolis of Tehran (Case study: Villages of Islamshahr County). *Journal of Research & Rural Planning*, *12*(4), 99-124. [in Persian] http://dx.doi.org/10.22067/jrrp.v12i4.2312-1097

Anabestani, A., Zolfaghari, M., & Tavakolinia, J. (2024). Analysis of Factors Influencing the Formation of the Smart Village Approach in Iran. *Geographical Studies of Arid Regions*, *15*(56), 46–69. [in Persian] https://doi.org/10.22034/jargs.2023.402096.1039

Aryal, J. P., Sapkota, T. B., Khurana, R., Khatri-Chhetri, A., Rahut, D. B., & Jat, M. L. (2020). Climate change and agriculture in South Asia: Adaptation options in smallholder production systems. *Environment, Development and Sustainability*, *22*(6), 5045–5075. https://doi.org/10.1007/s10668-019-00414-4

Bacco, M., Berton, A., Gotta, A., & Zoppi, T. (2019). IoT as a Digital Game Changer in Rural Areas: The DESIRA Project. *Agriculture*, *9*(8), 180. https://doi.org/10.3390/agriculture9080180Semantic Scholar

Bahadori Amjaz, F. L., Anabestani, A. A., & Tavakolinia, J. (2022). The Role of Main Components of Smart Growth Approach in the Sustainable Development of Rural Settlements (Case Study: Jiroft County). *Scientific Journal of Spatial Planning*, *12*(2), 91–118. [in Persian] https://doi.org/10.22108/sppl.2022.132321.1639

Beg, M. D. (2018). Smart and sustainable rural development. *International Journal of Recent Scientific Research*, *9*(1), 23427-23429. http://dx.doi.org/10.24327/ijrsr.2018.0901.1466

Birthal, P. S., Negi, D. S., Khan, M. T., & Agarwal, S. (2015). Is Indian agriculture becoming resilient to droughts? Evidence from rice production systems. *Food Policy*, *56*, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2015.07.005

Bocchiola, D., Brunetti, L., Soncini, A., Polinelli, F., & Gianinetto, M. (2019). Impact of climate change on agricultural productivity and food security in the Himalayas: A case study in Nepal. *Agricultural Systems*, *171*, 113-125. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.01.008

Bogataj, D., Rogelj, V., & Salaj, A. T. (2021). Social Infrastructure supporting Ambient Assisted Living in a Smart Silver City: Literature Review and Research Agenda. *IFAC-PapersOnLine*, *54*(1), 942-947. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.111

Bokun, K., & Nazarko, J. (2023). Smart villages concept—A bibliometric analysis and state-of-the-art literature review. *Progress in Planning*, *175*, 100765. https://doi.org/10.1016/j.progress.2023.100765

Boschma, R. (2015). Towards an evolutionary perspective on regional resilience. *Regional Studies*, *49*(5), 733–751. https://doi.org/10.1080/00343404.2014.959481

Bristow, G., & Healy, A. (2020). Introduction to the handbook on regional economic resilience. In *Handbook on Regional Economic Resilience*. Edward Elgar Publishing. https://www.google.com/books/edition/Handbook_on_Regional_Economic

Brown, D. L., & Schafft, K. A. (2019). *Rural People and Communities in the 21st Century: Resilience and Transformation* (2nd ed.). Polity Press. https://doi.org/10.1177/14649934211032568

Coumou, D., & Rahmstorf, S. (2012). A decade of weather extremes. *Nature Climate Change*, *2*(7), 491-496. https://www.nature.com/articles/nclimate1452

Courtney, P., & Moseley, M. (2021). Rural development and resilience: The role of rural policies in building resilience. *European Planning Studies*, *29*(1), 1–19. https://doi.org/10.1080/09654313.2020.1779189

Crespo, J., Suire, R., & Vicente, J. (2022). Lock-in and resilience in regional innovation systems: A comparative study. *Regional Studies*, *56*(4), 589–601. https://doi.org/10.1080/00343404.2021.1989478

Cutter, S. L. (2016). Resilience to what? Resilience for whom? *The Geographical Journal*, *182*(2), 110–113. https://doi.org/10.1111/geoj.12174

Davoudi, S. (2012). Resilience: A bridging concept or a dead end? *Planning Theory & Practice*, *13*(2), 299–333. [in Persian] https://doi.org/10.1080/14649357.2012.677124

Defe, R., & Matsa, M. (2024). The significance of stakeholder engagement towards building sustainable climate smart villages in Mwenezi District. *Environmental Challenges*, 100855. https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100855

Degada, A., Thapliyal, H., & Mohanty, S. P. (2021). Smart village: An iot based digital transformation. In *2021 IEEE 7th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)* (pp. 459-463). IEEE. https://doi.org/10.1109/WF-IoT51360.2021.9594980

Ella, S., & Andari, R. N. (2018). Developing a smart village model for village development in Indonesia. In *2018 International Conference on ICT for Smart Society (ICISS)* (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICTSS.2018.8549973

Emerllahu, V., & Bogataj, D. (2024). Smart Villages as infrastructure of rural areas: Literature review and research agenda. *IFAC-PapersOnLine*, *58*(3), 268-273. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.162

Escarcha, J. F., Lassa, J. A., Palacpac, E. P., & Zander, K. K. (2020). Livelihoods transformation and climate change adaptation: The case of smallholder water buffalo farmers in the Philippines. *Environmental Development*, *33*, 100468. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2019.100468

European Commission. (2019). *EU Action for Smart Villages*. Brussels: European Commission. Retrieved from https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/rural-development/supporting-smart-village-strategies_enAgriculture and rural de

Evenhuis, E. (2017). New directions in researching regional economic resilience and adaptation. *Geography Compass*, *11*(11), e12335. https://doi.org/10.4337/9781785360862.00010

Fakhreghazi, M., Pourramzan, E., & Molaei Heshjin, N. (2022). Economic Resilience of Rural Settlements in Avaj County Against Environmental Hazards with Emphasis on Earthquakes. *Spatial Economy and Rural Development*, *11*(41), 57–76. [in Persian] http://serd.khu.ac.ir/article-3864-1-fa.html

Folke, C. (2016). Resilience (Republished). *Ecology and Society*, *21*(4), Article 44. https://doi.org/10.5751/ES-09088-210444

Gang, C., Jin, Z., & Yongtao, P. (2013). Agile security system model and algorithm for post-earthquake urgent relief provisions. *Journal of Natural Disasters*, *22*(3), 047-53.

Gong, H., & Hassink, R. (2020). Regional resilience: A critical review and a future research agenda. *Geography Compass*, *14*(9), e12582. https://doi.org/10.1111/gec3.12582

Harakal'ova, L. (2018). The Concept of Smart Villages (Smart Places) in EU Policies. *International Relations*, 221-26. www.europarl.europa.eu/RegData/etudes

Holmes, J. (2016). *The smart villages initlative, Smsrt Villages. New thinking for off-grid communities worldwide.* https://e4sv.org/wp-content/uploads/2015/08/Project-Outline.pdf

Hu, X., & Hassink, R. (2020). Adaptation and adaptability in regional innovation systems: The case of China's ICT industry. *Geoforum*, *110*, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2020.01.010

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Sixth Assessment Report: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

International Fund for Agricultural Development. (2016). *Rural Development Report 2016: fostering inclusive rural transformation*. https://www.ifad.org/documents.pdf

Kar, A., Belali, H., Movahedi, R., & Sharifzadeh, M. S. (2023). Evaluation of Components and Indicators for Assessing the Economic Resilience of Farmers Against Climate Hazards. *Rural Research*, *14*(2), 200–217. [in Persian] https://doi.org/10.22059/jrur.2023.92915

Keshavarz, M., & Karami, E. (2018). Drought and agricultural ecosystem services in developing countries. *Sustainable Agriculture Reviews 28: Ecology for Agriculture*, 309-359. [in Persian] https://doi.org/10.1007/978-3-319-90309-5_9

Keshavarz, M., & Moqadas, R. S. (2021). Assessing rural households' resilience and adaptation strategies to climate variability and change. *Journal of Arid Environments*, *184*, 104323. [in Persian] https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104323

Khan, I., Yu, Z., & Khan, S. (2022). Role of ICT in climate-smart agriculture: Evidence from developing countries. *Technological Forecasting and Social Change*, *180*, 121684. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121684

Komorowski, S., Stanny, M., & Banski, J. (2021). Smart villages as a way to achieve sustainable rural development in the EU. *Sustainability*, *13*(3), 1235. https://doi.org/10.3390/su13031235

Liu, H., Pan, W., Su, F., Huang, J., Luo, J., Tong, L., ... & Fu, J. (2022). Livelihood resilience of rural residents under natural disasters in China. *Sustainability*, *14*(14), 8540. https://doi.org/10.3390/su14148540

Lobao, L., Adua, L., & Hooks, G. (2020). Privatization, Business Attraction, and Social Services across the United States: Local Governments' Use of Market-Oriented, Neoliberal Policies in the Post-2000 Period. *Sociology of Development*, *6*(2), 139–168. https://doi.org/10.1525/sod.2020.6.2.139

Martin, R., & Sunley, P. (2015). On the notion of regional economic resilience: Conceptualization and explanation. *Journal of Economic Geography*, *15*(1), 1–42. https://doi.org/10.1093/jeg/lbu015

McDowell, J. Z., & Hess, J. J. (2012). Accessing adaptation: Multiple stressors on livelihoods in the Bolivian highlands under a changing climate. *Global Environmental Change*, *22*(2), 342-352. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.11.002

Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016). Defining Urban Resilience: A Review. *Landscape and Urban Planning*, *147*, 38–49. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011SCIRP

Nam, W. H., Choi, J. Y., Yoo, S. H., & Jang, M. W. (2012). A decision support system for agricultural drought management using risk assessment. *Paddy and Water Environment*, *10*(3), 197-207. https://doi.org/10.1007/s10333-012-0329-z

Nasrnia, F., & Ashktorab, N. (2021). Sustainable livelihood framework-based assessment of drought resilience patterns of rural households of Bakhtegan basin, Iran. *Ecological Indicators*, *128*, 107817. [in Persian] https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107817

Neumeier, S. (2017). Social innovation in rural development: identifying the key factors of success. *The Geographical Journal*, *183*(1), 34–46. https://doi.org/10.1111/geoj.12180

Nielsen, Ø. J., Rayamajhi, S., Uberhuaga, P., Meilby, H., & Smith-Hall, C. (2013). Quantifying rural livelihood strategies in developing countries using an activity choice approach. *Agricultural Economics*, *44*(1), 57-71. https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2012.00632.x

Norouzi, A. (2021). Analyzing Indicators and Feasibility of Smart Village Development (Case Study: Avargan Village). *Journal of the Iranian Geographical Society*, *19*(68), 251–263. [in Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.27172996.1400.19.1.15.7

OECD. (2020). *Rural Well-being: Geography of Opportunities*. OECD Rural Studies, OECD Publishing, Paris. https://doi.org/10.1787/d25cef80-en

Praveen, P., Khan, A., Verma, A. R., Kumar, M., & Peoples, C. (2023). Smart village infrastructure and rural communities. In *Smart Village Infrastructure and Sustainable Rural Communities* (pp. 1-15). IGI Global. https://pure.ulster.ac.uk/en/publications/smart-village-infrastructure-and-rural-communities/

Quandt, A. (2018). Measuring livelihood resilience: The household livelihood resilience approach (HLRA). *World Development*, *107*, 253-263. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.02.024

Quandt, A., Neufeldt, H., & McCabe, J. T. (2017). The role of agroforestry in building livelihood resilience to floods and drought in semiarid Kenya. *Ecology and Society*, *22*(3). https://www.jstor.org/stable/26270151

Reed, M. S., Podesta, G., Fazey, I., Geeson, N., Hessel, R., Hubacek, K., ... & Thomas, A. D. (2013). Combining analytical frameworks to assess livelihood vulnerability to climate change and analyse adaptation options. *Ecological Economics*, *94*, 66-77. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.07.007

Salaj, A. T., Jančar, J., Brus, M. Š., & Trpin, G. (2011). The Development of the Real Estate Investment Fund for the Purpose of Regional Development. *Lex Localis: Journal of Local Self-Government*, *9*(3), 265-285. https://doi.org/10.4335/9.3.265-281(2011

Samuel, J., Rama Rao, C. A., Pushpanjali, Anshida Beevi, C. N., Raju, B. M. K., Amarender Reddy, A., ... & Teggelli, R. G. (2024). Enhancing farm income resilience through climate smart agriculture in drought-prone regions of India. *Frontiers in Water*, *6*, 1327651. https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1327651

Simmie, J., & Martin, R. (2010). The economic resilience of regions: Towards an evolutionary approach. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, *3*(1), 27–43. https://doi.org/10.1093/cjres/rsp029

Singh, A., & Patel, M. (2018). Achieving inclusive devlopment through smart village. *Journal of Energy and Management*, *3*(1), 37-43.

Sobczyk, W. (2014). Sustainable development of rural areas. *Problemy Ekorozwoju*, *9*(1), 119-126. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.05.038

Soligno, R., Scorza, F., Amato, F., Cascini, G., Savino, D., & Murgante, B. (2015). Smart solutions for the development of rural communities. In *REAL CORP 2015. PLAN TOGETHER–RIGHT NOW–OVERALL. From Vision to Reality for Vibrant Cities and Regions. Proceedings of 20th International Conference on Urban Planning, Regional Development and Information Society* (pp. 861-874). CORP–Competence Center of Urban and Regional Planning. https://repository.corp.at/75/

Somwanshi, R., Shindepatil, U., Tule, D., Mankar, A., Ingle, N., Rajamanya, G. B. D. V., & Deshmukh, A. (2016). Study and development of village as a smart village. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, *7*(6), 395-408.

Steiner, A., & Atterton, J. (2015). Exploring the contribution of rural enterprises to local resilience. *Journal of Rural Studies*, *40*, 30–45. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2015.05.004

Sutton, J., & Arku, G. (2022). Regional economic resilience: A review and synthesis of recent research. *Regional Studies*, *56*(3), 456–468. https://doi.org/10.1080/00343404.2021.1989477

Talukder, M. S., & Caputi, P. (2021). Smart Villages: A New Paradigm for Rural Development. *Sustainability*, *13*(2), 1000. https://doi.org/10.3390/su13021000

Thulstrup, A. W. (2015). Livelihood resilience and adaptive capacity: Tracing changes in household access to capital in Central Vietnam. *World Development*, *74*, 352-362. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.05.019

Van Daalen, K. R., Tonne, C., Semenza, J. C., Rocklöv, J., Markandya, A., Dasandi, N., ... & Lowe, R. (2024). The 2024 Europe report of the Lancet Countdown on health and climate change: unprecedented warming demands unprecedented action. *The Lancet Public Health*, *9*(7), e495-e522. https://www.thelancet.com/journals/lanpub/article

Visvizi, A., Lytras, M. D., & Mudri, G. (2022). Smart villages and digital transformation: Concepts, practices and policies. *Sustainability*, *14*(5), 2911. https://doi.org/10.3390/su14052911

Visvizi, A., Lytras, M. D., & Mudri, G. (Eds.). (2019). *Smart Villages in the EU and Beyond*. Deree College – The American College of Greece. https://doi.org/10.1108/9781787698451

Viswanadham, N., & Vedula, S. (2010). *Design of smart villages*. Indian School of Business Hyderabad 500032, India. https://gtl.csa.iisc.ac.in/nv/Mypublications/C/z.pdf

Wang, P., Qiao, W., Wang, Y., Cao, S., & Zhang, Y. (2020). Urban drought vulnerability assessment–A framework to integrate socio-economic, physical, and policy index in a vulnerability contribution analysis. *Sustainable Cities and Society*, *54*, 102004. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.102004

Wilson, G. A. (2020). Community resilience, social memory and the post-2015 development agenda. *Ambio*, *49*(1), 1–9. https://doi.org/10.1007/s13280-019-01258-0

Woods, M., Anderson, J., & Farrington, J. (2021). Rural resilience in the face of uncertainty. *Rural Studies Review*, *12*(3), 215–233. https://doi.org/10.1016/j.rsr.2021.03.005

World Bank Group. (2016). *World development report 2016: Digital dividends*. World Bank Publications.

Yadav, A., Vijay, A., Goyal, V., & Mukherjee, R. (2022). Smart Village: Problems and Hybrid Solutions from IoT Perspective. In *2022 2nd International Conference on Innovative Sustainable Computational Technologies (CISCT)* (pp. 1-5). IEEE. https://doi.org/10.1109/CISCT55310.2022.10046527

Yeung, H. W. C. (2019). Rethinking mechanism and geographical political economy. *Environment and Planning A: Economy and Space*, *51*(1), 3–25. https://doi.org/10.1177/0308518X18763265

Zhang, F., Bao, X., Deng, X., Wang, W., Song, J., & Xu, D. (2022). Does Trust Help to Improve Residents' Perceptions of the Efficacy of Disaster Preparedness? Evidence from Wenchuan and Lushan Earthquakes in Sichuan Province, China. *International journal of environmental research and public health*, *19*(8), 4515. https://doi.org/10.3390/ijerph19084515

Zhao, X., & Zhao, R. (2024). The Impact and Mechanism of Digital Villages on Agricultural Resilience in Ecologically Fragile Ethnic Areas: Evidence from China's Provinces. *Agriculture*, *14*(2), 221. https://doi.org/10.3390/agriculture14020221

(Research Journal)
VOLUME 15, NO 57, Spring 2026

CONTENTS

Assessment of Land-Use Changes Impact on River Morphology and Its Implications for Increasing Flood Hazard (Case Study: Qara -Su River, Ardabil) **1**

Masoud Rahimi, Mehrdad Vahabzadeh Zargari

Normalized Longitudinal River Profiles Pattern Analysis in Selected Basins of the Makran Accretionary Prism **23**

Reza Mansouri

Assessment of Geomorphological Quality of the Nirchai River in Ardabil Province Using the MQI Method **47**

Behrouz Nezafat Takleh, Fariba Esfandyari, Raoof Mostafazadeh, Mousa Abedini

Assessment of Land Subsidence in the Marand Plain Using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) **72**

Shahram Roostaei, Seyyed Asadullah Hejazi, Davood Mokhtari, Davood Amani

Investigation of Soil Microbial Community Dynamics across Different Ages of Haloxylon Persicum Plantations in the Arid Ecosystems of Birjand, Eastern Iran **96**

Morteza Saberi, Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleno, Rasool Khatibi, Mehdi Sarparast

Investigating Temporal and Spatial Changes in Groundwater Pollution in the Yazd-Ardakan Plain Using the Pollution Index of Groundwater (PIG) **114**

Somayeh Soltani Gerdefaramarzi, Zahra Rahmani-Samani

Assessment of Reanalysis Derived Snow Depth Uncertainty in Northwestern Iran Using ERA5-Land and MERRA-2 **132**

Bromand Salahi, Ali Shahi

Assessment of the Relationship between Jet Stream Patterns and Cold Temperature Extremes (CTEs) in Iran **153**

Nahid Mohammadi, Firouz Mojarrad, Jafar Masompour Samakoosh

Future Projection of Precipitation across the Altitudinal Zones of Iran **170**

Elham Salahshur Boghmechi, Reza Doostan, Iman Babaeian

Assessment of the Effects of Urban Green Patches Distribution and Surface Biophysical Characteristics on the Spatial Patterns of Urban Heat Islands Using Remote Sensing and GIS Techniques (Case Study: Mosul City in 2024) **193**

Ebrahim Sami, Mohammad Saleh Sish, Keyvan Mohammadzadeh Alajujeh

Application of Machine Learning Algorithms in Flood Risk Management with Emphasis on Tourist- Oriented Rural Settlements (Case Study: the Bisotun Tourist Sample Area, Kermanshah Province) **226**

Farhad Javan, Davood Jamini, Ramin Atashbahar

Analysis of Key Driving Forces of Smartization Impacts on the Economic Resilience of Rural Households in the Face of Climate Change: A Futures Studies Approach (Case Study: Ferdows, Boshrouyeh and Sarayan Counties) **251**

Ali Akbar Anabestani, Nabiollah Taheri, Pegah Moridsadat

Editor-in-Chief: Prof. Seyed Reza Hosseinzadeh
Department of Geography Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Director: **Prof. Seyed Reza Hosseinzadeh**
Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
English Language Editor: Dr. Mahdieh Ghayoor Bolorfroshan
Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Managing Editor: Dr. Masoud Rahimi
Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Executive Director: Dr. Mahdieh Ghayoor Bolorfroshan
Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Language Editor: Ensieh Sabokkhiz Khayat
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

International Editorial Board:

Prof. Victor R. Baker
Department of Hydrology and Water Resource, University of Arizona, USA
Prof. Ziyadin Çakir
Department of Geology, Istanbul Technical University, Turkey
Prof. Gao-Lin Wu
Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences
Dr. Masoud Irannezhad
Department of Civil Engineering, Australian College of Kuwait, Mubarak Al-Kabeer, Kuwait
Dr. Dimitris G. Kaskaoutis
Chemical Engineering, University of Western Macedonia: Kozani, Greece
Prof. Mingrui Qiang
Arid Environment and Climate Change, Lanzhou University Lanzhou, China

Iranian Editorial Board:

Dr. Morteza Akbari
Department of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Dr. Hamid Ejtehadi
Department of Biology, Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Dr. Mohammad Reza Esfehani
Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Dr. Bakhtiar Feizizadeh
Department of Geography, University of Tabriz, Tabriz, Iran
Prof. Manijeh Ghahroudi Tali
Department of Geography, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
Dr. Alireza Karimi
Department of Soil Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Prof. Golamreza Lashkaripour
Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Dr. Abolfazl Masudian
Department of Physical Geography, University of Isfahan, Isfahan, Iran
Dr. Masoud Minaei
Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Dr. Masoud Mirzaei Shahrabi
Department of Chemistry, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Dr. Hossein Mohammadzadeh
Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Dr. Alireza Rashki
Department of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Dr. Hossein Shafizadeh-Moghadam
Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
Dr. Shaban Shataee Joybari
Department of Forest Sciences, University of Gorgan, Gorgan, Iran
Dr. Kkalil ValizadehKamran
Department of Remote Sensing and GIS, Tabriz University, Tabriz, Iran
Dr. Mojtaba Yamani
Department of Physical Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
Dr. Azar Zarrin
Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Geography and Environmental Hazards (ISSN:2322-1682) is published four times a year in June, September, December and March by Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
Postal Code: 9177948883, Tel: +98(0) 5138805273 Fax: +98(0) 51 38794144
E-mail: geo.eh@um.ac.ir Website : http://geoeh.um.ac.ir

Aims

Geography and Environmental Hazards is an interdisciplinary Iranian research journal that highlights geographical themes such as the degree of geographical hazard in various regions, human exposure to risk, vulnerability, public awareness, disaster response, and planning strategies to mitigate the impacts of environmental hazards.
The journal also addresses the role of hazards in influencing development processes, particularly in developing countries, and engages with issues related to efficiency, social equity, and sustainability.

Scopes

The journal welcomes high-quality original research articles, review papers, short communications, case studies, methodological contributions, and applied research on the following topics:

- **Geological and Geomorphological Hazards**: Earthquakes, soil liquefaction, volcanic eruptions, lahars, tsunamis, land subsidence, landslides, lateral spreading, debris flows, rockfalls, mudflows, avalanches, soil piping, and related processes.
- **Hydrological -geomorphological Hazards**: Riverine floods, urban inundation, sea-level fluctuations, coastal erosion, water erosion, wind erosion, dune migration, salt weathering, saline water intrusion, desertification, and soil salinization.
- **Climatic and Atmospheric Hazards**: Climate change, dust storms, haboobs, firestorms, blizzards, tornadoes, extreme weather events, droughts, severe frosts, heatwaves, fog, lightning, cosmic radiation, and ultraviolet exposure.
- **Bio-physical and Biological Hazards**: Natural wildfires, agricultural frosts, allergies, viral outbreaks, food poisoning, epidemics, chronic diseases (e.g., cancer), plant pests and diseases, and insect infestations.
- **Technological Hazards**: Air, soil, and water pollution, industrial contamination, chemical hazards, noise pollution, nuclear radiation, electronic waste, radioactive waste, dam failures, transport accidents, fires, chemical spills, and anthropogenic construction hazards.
- **Socio-cultural Hazards**: Mental health crises, aggression, stress and depression, ethnic and social conflicts, theft, drug addiction, conventional and hybrid warfare, political unrest, border disputes, high-risk behaviors, and urban–rural vulnerabilities.
- **Environmental Hazard Management**: Crisis management, active and passive risk management, emergency response and rescue, post-disaster recovery, and strategic planning for hazard mitigation.

Guide for Authors

The ***Journal of Geography and Environmental Hazards*** accepts articles exclusively on topics related to environmental hazards (both natural and human-induced) due to its specialized nature. Articles must represent the original research of the author(s) and should not have been previously published in any domestic or international journals, conference proceedings, or submitted simultaneously to another journal.

Article Submission Process

Online Submission System:

The *Journal of Geography and Environmental Hazards* processes only articles submitted through its official website: https://geoeh.um.ac.ir/author

Language and Style:
Articles are accepted in Persian with an extended abstract in English.

Types of Articles

- Original research articles
- Review articles
- Short communications
- Technical notes or methodological articles
- Case studies

Note:

- Articles presented at conferences may be considered if they include significant revisions and additional content.
- Review articles that cover recent advancements in the journal's topics will only be accepted from experienced authors with relevant research publications.

Article Preparation

For detailed information on the structure of each section of the article, click here.

Conflict of Interest and Commitment Forms:
Authors must upload these forms during article submission.

Conflict of interest Form
Authorship statement Form

Formatting Requirements

The article structure should include:

1. Extended abstract in English (comprising *Introduction* (Purpose, literature review, etc.), *Materials and Methods*, *Results and Discussion*, *Conclusion*),
2. Title, abstract, and keywords,
3. Main sections: *Introduction*, *Study Area*, *Materials and Methods*, *Results and Discussion*, *Conclusion*, and *References*.

Important: For accuracy, both Persian and English versions of the extended abstract must be submitted.

Word Count Limits:

- Main article text: 3,000–7,000 words
- Extended English abstract: 700–1,500 words
- Keywords: 3–5 words
- References: 20–50 for research articles; 50–300 for review articles

Formatting Guidelines

- Articles should be submitted in A4 format, single-column, and without logos.
- All pages must be numbered, and the article length (excluding tables and figures) must not exceed 15 pages.
- Margins: 3.5 cm (top and bottom), 3 cm (left and right).
- Line spacing: Single.
- Footnotes must restart numbering on each page.
- Main and subheadings should not be numbered.
- Numerical data in the text must be in Persian numerals, except within tables and figures.
- Figure captions (below) and table titles (above) should be bilingual (Persian and English).
- In-text citations and references must be in English (parentheses in Persian font).
- Use half-spaces throughout the text.
- Numbered or bulleted lists should have a 0.5 cm indent before the text.

Font

- Persian text: B Nazanin
- English text: Times New Roman
- Font sizes:
    - Persian and English titles: 16, 14(bold)
    - Main headings: 12 (bold)
    - Body text: 12
    - Latin text: 10
    - Scientific names: Italic
    - Captions for figures and tables: 11 (Persian), 10 (English)
    - Table and figure numbers: Bold

Tables

- Submit tables in editable text format, not as images.
- Place tables near their related text or in a separate section at the end.
- Number tables sequentially based on their appearance in the text.
- Provide bilingual titles (Persian: B Nazanin, 11, Bold; English: Times New Roman, 10, Bold).
- Data in Persian tables must include English equivalents.
- Avoid vertical lines and shading in table cells.

Figures and Images

- Submit figures/images as separate files and reference them in the text.
- Number figures/images sequentially as they appear.
- Titles for figures/images must be bilingual (below the figure: Persian, B Nazanin, 11; English, Times New Roman, 10).

Mathematical Equations

- Present equations in two-column invisible tables.
- Number equations sequentially, enclosed in parentheses.
- Use Times New Roman, font size 10, for equations.

Units of Measurement

- Follow the SI (metric) system.
- Use exponential notation (e.g., m s^{-1} instead of m/s).

References

- Use the 6th edition of the APA citation style. Tools like EndNote or Word are recommended.
- In-text citations and the reference list must be in English.
- For Persian sources, provide English bibliographic details from official pages or sites and indicate [In Persian].
- Ensure all citations include DOI if available.
- Follow alphabetical order for author names in the reference list.

Publication Fees

The ***Journal of Geography and Environmental Hazards*** does not charge for the initial review. However, accepted articles must pay a fee of 6 million Rials for editing and publication costs.

Promoting Published Articles

- Share your article on platforms like ResearchGate, Academia.edu, and Mendeley.
- Create an ORCID ID and link your article to your profile.
- Promote your article on social media using relevant hashtags.
- Cite the article in your presentations and share slides on platforms like SlideShare.
- Share your article's DOI link with colleagues and in your email signature.
- Share your slides related to the article on platforms such as SlideShare.
  Send your article to colleagues, researchers, and relevant research groups via email, and include the article's DOI link in your email signature.

(Research Journal)
VOLUME 15, NO 57, Spring 2026

CONTENTS

Assessment of Land-Use Changes Impact on River Morphology and Its Implications for Increasing Flood Hazard (Case Study: Qara -Su River, Ardabil) **1**

Masoud Rahimi, Mehrdad Vahabzadeh Zargari

Normalized Longitudinal River Profiles Pattern Analysis in Selected Basins of the Makran Accretionary Prism **23**

Reza Mansouri

Assessment of Geomorphological Quality of the Nirchai River in Ardabil Province Using the MQI Method **47**

Behrouz Nezafat Takleh, Fariba Esfandyari, Raoof Mostafazadeh, Mousa Abedini

Assessment of Land Subsidence in the Marand Plain Using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) **72**

Shahram Roostaei, Seyyed Asadullah Hejazi, Davood Mokhtari, Davood Amani

Investigation of Soil Microbial Community Dynamics across Different Ages of Haloxylon Persicum Plantations in the Arid Ecosystems of Birjand, Eastern Iran **96**

Morteza Saberi, Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleno, Rasool Khatibi, Mehdi Sarparast

Investigating Temporal and Spatial Changes in Groundwater Pollution in the Yazd-Ardakan Plain Using the Pollution Index of Groundwater (PIG) **114**

Somayeh Soltani Gerdefaramarzi, Zahra Rahmani-Samani

Assessment of Reanalysis Derived Snow Depth Uncertainty in Northwestern Iran Using ERA5-Land and MERRA-2 **132**

Bromand Salahi, Ali Shahi

Assessment of the Relationship between Jet Stream Patterns and Cold Temperature Extremes (CTEs) in Iran **153**

Nahid Mohammadi, Firouz Mojarrad, Jafar Masompour Samakoosh

Future Projection of Precipitation across the Altitudinal Zones of Iran **170**

Elham Salahshur Boghmechi, Reza Doostan, Iman Babaeian

Assessment of the Effects of Urban Green Patches Distribution and Surface Biophysical Characteristics on the Spatial Patterns of Urban Heat Islands Using Remote Sensing and GIS Techniques (Case Study: Mosul City in 2024) **193**

Ebrahim Sami, Mohammad Saleh Sish, Keyvan Mohammadzadeh Alajujeh

Application of Machine Learning Algorithms in Flood Risk Management with Emphasis on Tourist- Oriented Rural Settlements (Case Study: the Bisotun Tourist Sample Area, Kermanshah Province) **226**

Farhad Javan, Davood Jamini, Ramin Atashbahar

Analysis of Key Driving Forces of Smartization Impacts on the Economic Resilience of Rural Households in the Face of Climate Change: A Futures Studies Approach (Case Study: Ferdows, Boshrouyeh and Sarayan Counties) **251**

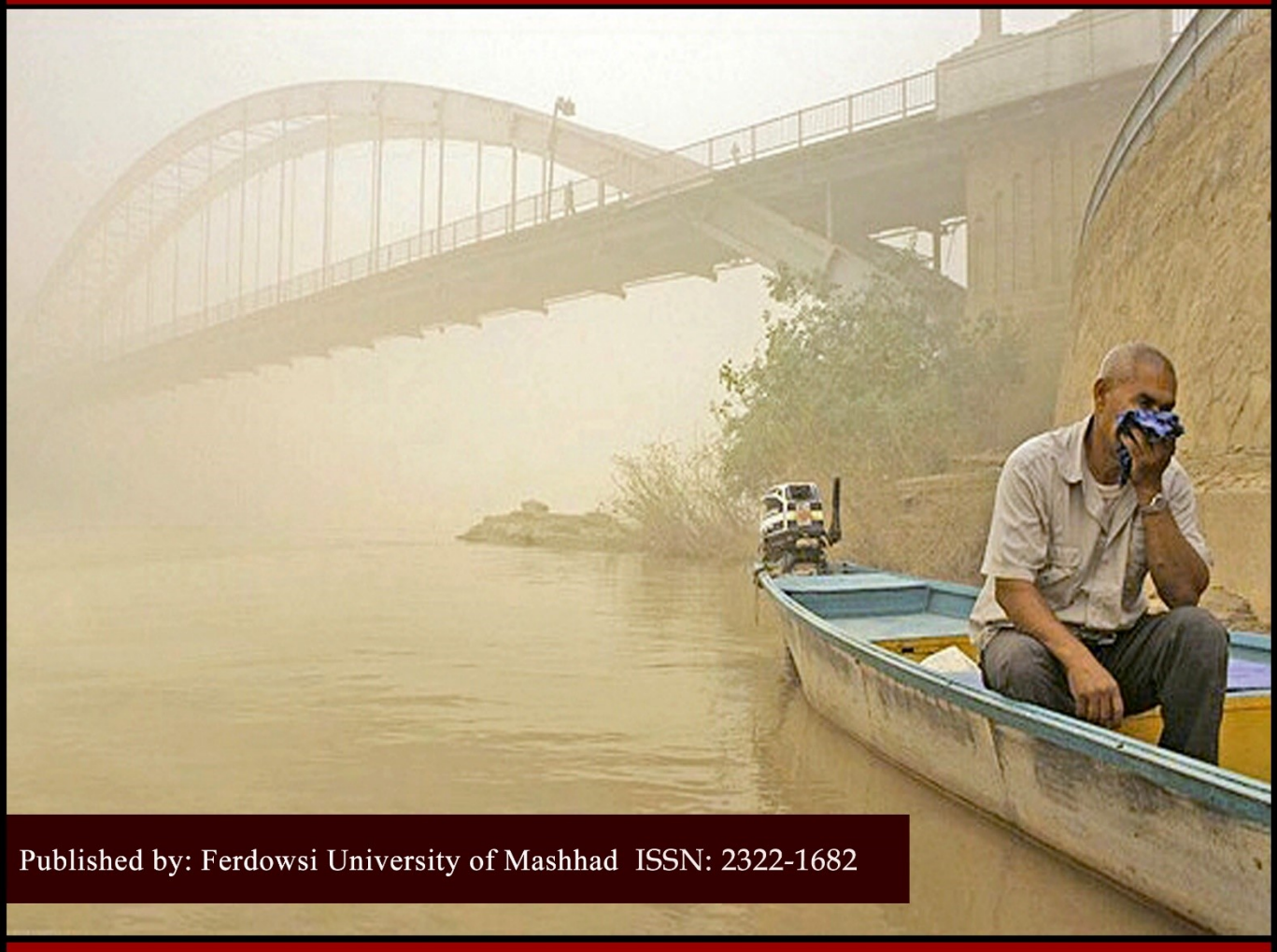
Ali Akbar Anabestani, Nabiollah Taheri, Pegah Moridsadat

Ferdowsi University of Mashhad

Vol.15, No. 1, Spring 2026

Journal of Geography and Environmental Hazards

Research Journal



Published by: Ferdowsi University of Mashhad ISSN: 2322-1682

Desert Dust Storm in Ahvaz, Southwest Iran