سال چهاردهم، شماره ۴، پیاپی۵۶، زمستان ۱۴۰۴

(نشریه علمی)

مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی



دانشگاه فردوسی مشهد، شاپا: ۲۳۲۲-۱۶۸۲

فصلنامه
جغرافیا و مخاطرات محیطی
(نشریه علمی)

سال چهاردهم، شماره پنجاه و ششم، زمستان ۱۴۰۴

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

عنوان

به کارگیری تکنیک PS-InSAR برای شناسایی تأثیرات فرونشست زمین بر پل‌های جاده‌ای جنوب غربی شهر تهران
ساسان زنگنه‌تبار، مجتبی یمانی، محمد شریفی‌کیا، سید موسی حسینی، معصومه آمیغ‌پی

تحلیل مورفوتکتونیکی حوضهٔ سفیدرود، ایران: کاربرد تلفیقی دنباله فیبوناچی و توزیع گاما در شناسایی الگوهای ساختاری فعال
غلام حسن جعفری

جابه‌جایی کانال و فرسایش کناره‌ای در رودخانهٔ خرم‌رود طی بازه زمانی ۲۰۲۵-۲۰۰۶
محمد مهدی حسین زاده، شهرام امیری

تحلیل پتانسیل وقوع زمین‌لغزش با تأکید بر تأثیر زمین‌لرزه‌ها (مطالعهٔ موردی: مسیر ارتباطی کرند تا سرپل‌ذهاب)
حمید گنجائیان، میلاد فیروزه، علی میرآخورلی، تکتم یزدانی

مقایسهٔ پهنه‌بندی شوری خاک با استفاده از روش‌های دورسنجی و زمین آمار در اراضی دشت آبرفتی رودخانهٔ دجلهٔ عراق
مروان الرفاهی، علیرضا کریمی، ابراهیم محمودآبادی، مرتضی اکبری

پایش و تحلیل زمانی– مکانی پوشش برف و مؤلفه‌های مرتبط با آن در پهنهٔ رشته‌کوه البرز
وحید صفریان

پیش‌نمایی خشکسالی‌های کوتاه‌مدت در ایران: تحلیل جامع بر اساس سناریوی SSP5-8.5
علیرضا کربلائی درئی، فائزه شجاع، سعیده اشرفی، محمدکمانگر

ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش خطر سیلاب شهری (UFRM) با رویکرد دورهٔ کوتاه مدت (۲ ساله)، مطالعهٔ موردی: کلان‌شهر تبریز
مهدی هریسچیان، حسن محمودزاده

بررسی نقش شهر هوشمند در ارتقای تاب‌آوری شهری در برابر مخاطرات محیطی (مطالعهٔ موردی: شهر زنجان)
حسین طهماسبی مقدم، زهرا رسول‌زاده

طراحی پایدار فضای سبز شهری برای کاهش آلودگی صوتی با رویکرد سازگاری اقلیمی
احمد حسینی، زینب کریم‌زاده مطلق

تحلیل الگوی مکانی تاب‌آوری کالبدی سکونتگاه‌های روستایی شهرستان رودبار در برابر زلزله
مریم ضرغام‌پور، تیمور آمار، پرویز رضایی

مهاجرت کمکی و اصلاح مرز مناطق حفاظت شده به عنوان استراتژی‌های سازگاری با اقلیم جهت حمایت از بقاء خزندگان TSD (درس‌هایی از Crocodylus Palustris)
ملیحه عرفانی، عبدالرسول سلمان ماهینی

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

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 چهاردهم، شماره پنجاه و ششم، زمستان ۱۴۰۴

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 ۷۰۰ 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**: ۷۰۰ 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 ۱٫۵ (۵ lines) 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 فارسی10 ,B Nazanin 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.2 ،1 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

صیاد اصغری سراسکانرود	استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
حسین اعتمادفر	استادیار گروه آموزشی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
جمیل امان اللهی	دانشیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
شهرام بهرامی	دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
مهرداد چراغی	استاد گروه محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، همدان، ایران
سید اسعد حسینی	کارشناس هواشناسی همدیدی، اداره کل هواشناسی استان کردستان، سنندج، ایران
میلاد حسنعلی زاده	دانش آموخته دکتری جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
محسن حمیدیان پور	دانشیار جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
رضا دوستان	دانشیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
علیرضا راشکی	دانشیار مهندسی منابع طبیعی - بیابان زدایی، گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
بهزاد رایگانی	دانشیار پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، تهران، 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
طاهره صادقلو	دانشیار جغرافیا و برنامه ریزی روستایی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
میثم طولابی نژاد	دانش آموخته دکترای آب و هواشناسی شهری، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
مهدیه غیور بلورفروشان	مدرس مدعو گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
منیژه قهرودی تالی	استاد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران
حسن محمودزاده	استاد گروه برنامه ریزی شهری و منطقه‌ای، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
علیرضا محمدی	استاد گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
ابوالفضل مساعدی	استاد مهندسی عمران (هیدرولیک)، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
رئوف مصطفی زاده	دانشیار گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
جواد مهدی زاده سولا	گروه جغرافیای طبیعی،دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس ، تهران، ایران
مسعود مینائی	دانشیار علوم اطلاعات جغرافیایی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
خلیل ولیزاده کامران	استاد سنجش از دور، گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
مهرداد وهاب زاده	کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی و آمایش محیط، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
فریبا همتی	استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران

فهرست مندرجات

عنوان	صفحه
به کارگیری تکنیک PS-InSAR برای شناسایی تأثیرات فرونشست زمین بر پل‌های جاده‌ای جنوب غربی شهر تهران ساسان زنگنه‌تبار، مجتبی یمانی، محمد شریفی‌کیا، سید موسی حسینی، معصومه آمیغ‌پی	۱
تحلیل مورفوتکتونیکی حوضهٔ سفیدرود، ایران: کاربرد تلفیقی دنباله فیبوناچی و توزیع گاما در شناسایی الگوهای ساختاری فعال غلام حسن جعفری	۲۱
جابه‌جایی کانال و فرسایش کناره‌ای در رودخانهٔ خرم‌رود طی بازه زمانی ۲۰۲۵-۲۰۰۶ محمد مهدی حسین زاده، شهرام امیری	۴۳
تحلیل پتانسیل وقوع زمین‌لغزش با تأکید بر تأثیر زمین‌لرزه‌ها (مطالعهٔ موردی: مسیر ارتباطی کرند تا سرپل‌ذهاب) حمید گنجائیان، میلاد فیروزه، علی میرآخورلی، تکتم یزدانی	۶۶
مقایسهٔ پهنه‌بندی شوری خاک با استفاده از روش‌های دورسنجی و زمین آمار در اراضی دشت آبرفتی رودخانهٔ دجلهٔ عراق مروان الرفاهی، علیرضا کریمی، ابراهیم محمودآبادی، مرتضی اکبری	۸۵
پایش و تحلیل زمانی– مکانی پوشش برف و مؤلفه‌های مرتبط با آن در پهنهٔ رشته‌کوه البرز وحید صفریان	۱۰۵
پیش‌نمایی خشکسالی‌های کوتاه‌مدت در ایران: تحلیل جامع بر اساس سناریوی SSP5-8.5 علیرضا کربلائی درئی، فائزه شجاع، سعیده اشرفی، محمدکمانگر	۱۲۹
ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش خطر سیلاب شهری (UFRM) با رویکرد دورهٔ کوتاه مدت (۲ ساله)، مطالعهٔ موردی: کلان‌شهر تبریز مهدی هریسچیان، حسن محمودزاده	۱۵۳
بررسی نقش شهر هوشمند در ارتقای تاب‌آوری شهری در برابر مخاطرات محیطی (مطالعهٔ موردی: شهر زنجان) حسین طهماسبی مقدم، زهرا رسول‌زاده	۱۸۱
طراحی پایدار فضای سبز شهری برای کاهش آلودگی صوتی با رویکرد سازگاری اقلیمی احمد حسینی، زینب کریم‌زاده مطلق	۲۰۱
تحلیل الگوی مکانی تاب‌آوری کالبدی سکونتگاه‌های روستایی شهرستان رودبار در برابر زلزله مریم ضرغام‌پور، تیمور آمار، پرویز رضایی	۲۳۰
مهاجرت کمکی و اصلاح مرز مناطق حفاظت شده به عنوان استراتژی‌های سازگاری با اقلیم جهت حمایت از بقاء خزندگان TSD (درس‌هایی از Crocodylus Palustris) ملیحه عرفانی، عبدالرسول سلمان ماهینی	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. 14, No.4, Winter 2025, p. 1-20 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.93735.1575 OPEN ACCESS

Using the PS-InSAR Technique to Assess the Impacts of Land Subsidence on Road Bridges in Southwest Tehran

Sasan Zangenehtabar [1], Mojtaba Yamani [2]*, Mohammad Sharifikia [3], Seyed Mousa Hoseini [4], Masoome Amighpey [5]

[1] Ph.D. Student in Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
[2] Professor in Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
[3] Associate Professor in Remote Sensing, Faculty of Literature and Humanities, University of Tarbiat Modarres, Tehran, Iran
[4] Associate Professor in Water Resources Engineering, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
[5] Head of the Precision Leveling and Radar Interferometry Department, National Cartographic Center, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 26 May 2025

Revised: 22 August 2025

Accepted: 15 September 2025

Available Online: 15 September 2025

Keywords:

Land Subsidence

PS-InSAR

Sentinel-1 SAR

Groundwater Depletion

Bridge Deformation

Metropolis of Tehran

ABSTRACT

In this study, the Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR) technique was applied to Sentinel-1 imagery acquired in 2022 in order to assess the impacts of land subsidence on urban structures in the southwestern part of Tehran. For this purpose, the GMTSAR and StaMPS software environments were employed. In addition, using groundwater level measurements from observation wells within the study area, the standardized cumulative groundwater level variations were calculated. The interferometric processing results indicate displacement rates ranging from +3 to −95 mm per year along the satellite line of sight across the southwestern of Tehran. The maximum subsidence is associated with the southern part of district 18 and the western part of district 19, with an annual rate of approximately −70 mm. The vertical displacement and lowering of bridge decks caused by subsidence were estimated to range between 2.3 and 4.5 cm per year. Field inspections of the studied bridges reveal that at bridge No. 3 (the intersection of Kazemi expressway and Shokoofeh boulevard), the manifestations of ground subsidence are clearly evident. The results of the correlation analysis between groundwater level fluctuations and the elevation changes recorded by bridge selected permanent scatterers demonstrate a strong relationship between the two variables. This high correlation indicates that, in addition to the downward motion associated with regional subsidence, hydrological saturation of the soil contributes to localized elevation changes affecting both the ground surface and human-made structures.

* Corresponding author: Mojtaba Yamani E-mail address: myamani@ut.ac.ir

How to cite this article: Zangenehtabar, S., Yamani, M., Sharifikia, M., Hoseini, S. M., & Amighpey, M. (2025). Using the PS-InSAR Technique to Assess the Impacts of Land Subsidence on Road Bridges in Southwest Tehran. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 14*(4), 1-20. https://doi.org/ 10.22067/geoeh.2025.93735.1575

©2025 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 the response of the earth surface to the development, exploitation and evolution of underground spaces caused by natural and human factors. Due to climate change, reduced rainfall, population growth and increasing water demand, human intrusion into groundwater aquifers has intensified and groundwater abstraction is the most common cause of subsidence. Subsidence induced subsurface voids can lead to severe consequences for structures, which highlights the need for geosynthetic reinforcement methods to mitigate these effects. Using radar interferometry, potential displacements of man-made structures can be monitored on a monthly and multi-day time scale. Furthermore, two main features make the interferometry technique attractive to the scientific community. First, it provides a high-resolution two-dimensional representation of deformation over distances of 10–100 km. Second, it allows high accuracy (up to 1 mm/year) in measuring deformation. Previous research on Tehran subsidence has mostly focused on preparing subsidence maps and defining its limits. So far, no study has examined the impact of subsidence on urban structures and infrastructure in Tehran. In this study, radar interferometry and the permanent scatterer method were used to investigate the behavior of road bridges in Tehran in relation to the subsidence zone and to quantify the extent to which bridges have been affected. These bridges are located in the southwest of Tehran, in municipal areas 17, 18, and 19. This area of Tehran corresponds to an alluvial plain with alluvial sediments of the Quaternary period.

Material and Methods

In this study, single look complex (SLC) radar images of the Sentinel-1 satellite in VV polarization were used for the year 2022 with a 12 days revisit interval. A total of 28 images were selected. The images are in descending orbit and were selected from path 35. The dataset was processed using the PS-InSAR technique with GMTSAR and StaMPS software. InSAR processing, including selecting the desired band from the image, initial processing, image cropping, and interferogram formation, was performed using GMTSAR software, and PS processing, including PS selection and retrieval, and preparation of time series graphs of bridge displacements, was performed using StaMPS software.

The main innovation of PSI approaches is the possibility of analyzing specific points on the Earth's surface (PSs) and monitoring their deformation time series. PSs are characterized by a stable amplitude and a coherent phase throughout the entire set of images in a dataset. PSs are usually fixed features on the Earth such as man-made structures and infrastructure (e.g., railways, buildings, bridges, towers), rock outcrops, and any other permanent feature that reflects a stable signal to the satellite.

Standardized cumulative groundwater level values were calculated using data from piezometric wells in the study area for the period 2002 to 2022. Also in order to investigate the relationship between groundwater level changes and bridge height changes, the correlation between the time series graph of PS points and changes in piezometer water levels for the same time period (2022) was determined.

Results and Discussion

Radar processing results indicate displacement rates ranging from +3 to -95 mm per year along the satellite line of sight in 2022. Maximum subsidence was observed in the southern part of district 18 and the western part of district 19, with an annual rate of approximately at -70 mm/year. Vertical displacement and lowering of bridge decks due to subsidence ranged between ±2.3 and ±4.5 cm per year. Field inspections indicated that most bridges were affected by ground subsidence, manifested as crack initiation in abutments and cracking of bridge deck asphalt. Bridge No. 3 (located in the intersection of Kazemi highway and shokoofeh boulevard on the east-west route) clearly showed the most pronounced effects of ground subsidence, including a localized 20 cm deep hole, collapse of the bridge wall facade, sinking of side steps, and outward deflection of the side parapets. Standardized cumulative groundwater level measurements in the subsidence area all indicate a sharp decline since 2013. To investigate the relationship between groundwater level changes and bridge elevation changes, the correlation between PS points time series and

piezometer water levels changes for the same period (2022) was calculated. The correlation coefficient was 0.37, which is statically significant. The time series changes of PS points of bridges No. 2 and 5 were compared with the changes of water level of the piezometer closest to each bridge. The correlation rate of permanent scatterers of bridge No. 2 was at least 0.922 and at most 0.957. Also, this rate was at least 0.423 and at most 0.794 for bridge No. 5.

Conclusion

The results of radar processing indicate a displacement rate of between +3 and -95 mm per year along the satellite line of sight. In fact, the center of subsidence is located in the southern plain of Tehran and has spread to the southwest of Tehran. The maximum subsidence is related to the south of area 18 and the western part of area 19 at -70 mm per year, which is spatially consistent with the research of Haghshenas & Moategh (2019) and Babaei et al. (2024). The results of the study of permanent scatterers selected on the bridge decks indicate the impact of ground subsidence in 2022. The displacement and lowering of the bridge decks due to subsidence was about ±2.3 to ±4.5 cm per year. Field visits to the studied bridges indicate that the bridges are mostly affected by ground subsidence in the form of opening of the bridge wall cracks and cracking of the bridge deck asphalt. Meanwhile, Bridge No. 3 clearly shows the effects of land subsidence. This bridge, which is located at the intersection of Kazemi highway and Shokoofeh boulevard, has noticeable subsidence at its western base. In this part, a 20-centimeter-deep hole has been created, the bridge wall facade has collapsed, the side steps of the bridge have sunk, and the side tables of the bridge steps have curved outwards.

The results of the standardized cumulative values of the piezometers in the subsidence area all indicate a sharp drop in groundwater since 2013. The results of investigating the relationship between groundwater level changes and bridge height changes indicate a high correlation between the height of the piezometers and changes in permanent scatterers. From the high correlation between the two, it can be understood that the land surface is strongly affected by changes in groundwater level, and the rise and fall of the water level of the aquifer will directly affect the land above it. With this in mind, it can be seen that excessive groundwater withdrawal and continuous decline in its level have a direct role in land subsidence in southwest Tehran, which can have irreparable effects on man-made structures in this area. The behavior of the selected permanent diffusers on the bridges shows that in addition to being affected by the long-term subsidence process caused by the decline in the groundwater level, the bridges are also severely affected by its short-term fluctuations, so that the rise in the groundwater level has caused an upward trend in the permanent diffuser diagram, which is consistent with the research of Elani et al. (2020), in monitoring the health of the old Aylesford bridge located in Kent, England, using the radar interferometry technique, which has shown that the upward and downward displacements of the bridge correspond to the soil saturation process during the hydrological cycle.

جلد ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، ص۲۰ -۱ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.93735.1575 دسترسی آزاد

به کارگیری تکنیک PS-InSAR برای شناسایی تأثیرات فرونشست زمین بر پل‌های جاده‌ای جنوب غربی شهر تهران

ساسان زنگنه‌تبار[۱]، مجتبی یمانی[۲*]، محمد شریفی‌کیا[۳]، سید موسی حسینی[۴]، معصومه آمیغ‌پی[۵]

[۱] دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکدهٔ جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۲] استاد ژئومورفولوژی، دانشکدهٔ‌جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۳] دانشیار سنجش از دور، دانشکدهٔ ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
[۴] دانشیار مهندسی منابع آب، دانشکدهٔ جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۵] رییس اداره ترازیابی دقیق و تداخل‌سنجی راداری، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴

کلمات کلیدی:

فرونشست زمین

تداخل‌سنجی راداری با پراکنشگرهای دائمی (PS-InSAR)

سنتیل ۱(SAR)

کاهش منابع آب زیرزمینی

تغییر شکل پل‌ها

کلان شهر تهران

چکیده

در این پژوهش با استفاده از روش پراکنشگرهای دائمی تکنیک تداخل‌سنجی راداری، تصاویر سنتینل۱ در بازهٔ زمانی سال ۲۰۲۲ به منظور بررسی تأثیرات فرونشست بر سازه‌های شهری جنوب غرب شهر تهران مورد پردازش قرار گرفت. برای این منظور از نرم‌افزارهای GMTSAR و Stamps استفاده شد. همچنین با استفاده از داده‌های سطح آب زیرزمینی چاه‌های محدودهٔ مورد مطالعه، مقدار تجمعی استاندارد شده تغییرات سطح آب زیرزمینی محاسبه شد. نتایج پردازش راداری نشان‌دهندهٔ میزان جابه‌جایی بین ۳+ تا ۹۵- میلی‌متر در سال در راستای خط دید ماهواره در جنوب غربی شهر تهران می‌باشد. بیشینهٔ فرونشست مربوط به جنوب منطقه ۱۸ و قسمت غربی منطقه ۱۹ به میزان ۷۰- میلی‌متر در سال می‌باشد. میزان جابه‌جایی و پایین رفتن عرشه پل‌ها در اثر فرونشست حدود ۲.۳ تا ۴.۵ سانتیمتر در سال بوده است. انجام بازدید میدانی از پل‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که در پل شماره ۳ (تقاطع بزرگراه کاظمی و بلوار شکوفه)، اثرات فرونشست زمین به خوبی محسوس است. نتایج حاصل از بررسی ارتباط تغییرات سطح آب زیرزمینی با تغییرات ارتفاعی پراکنشگرهای دائمی پل‌ها بیانگر میزان همبستگی بالای این دو می‌باشد. بالا بودن میزان همبستگی مؤید این نکته می‌باشد که علاوه بر تأثیرات فرورونده فرونشست، اشباع هیدرولوژیک خاک در ارتفاع یافتن سطح زمین و سازه‌های انسان‌ساخت تأثیرگذار است.

* نویسندهٔ مسئول: مجتبی یمانی
Email: myamani@ut.ac.ir

مقدمه

فرونشست زمین، واکنش سطح زمین به توسعه، بهره‌برداری و تکامل فضای زیرزمینی است که توسط عوامل طبیعی و انسانی ایجاد می‌شود. فرونشست زمین به معنی کاهش ارتفاع زمین، یک پدیدهٔ محیطی و زمین‌شناسی است (Castellazzi et al., 2016). فرآیند فرونشست شامل فعل و انفعالات پیچیده بین مواد مختلف با الاستیسیته متفاوت می‌باشد که منجر به تغییر در هندسه ساختاری این مواد به عنوان تکیه‌گاه سطح زمین می‌شود (Hakało & Wroński, 2003). عوامل متعددی سبب رخداد پدیده فرونشست زمین می‌شوند که می‌توان به انحلال و ریزش سنگ‌ها، آب‌شدگی یخ‌ها و تراکم نهشته‌ها، فعالیت‌های آتشفشانی، تحکیم خاک‌های رسی و فعالیت‌های تکتونیکی، فعالیت معدنکاری، تراکم آبی خاک‌های ریزشی، زهکشی و اکسیداسیون خاک‌های آلی، رخداد زمین‌لرزه، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، نشست ناشی از بارگذاری بیش از حد روی زمین، نشست ناشی از استخراج آب در مناطق ژئوترمال، تغییر کاربری زمین و استخراج نفت اشاره کرد. به دلیل تغییر اقلیم و کاهش بارندگی، رشد روزافزون جمعیت و افزایش نیاز آبی، هجوم انسان به سفره‌های آب زیرزمینی بیشتر شده است و برداشت آب زیرزمینی معمول‌ترین دلیل برای فرونشست است. فرونشست زمین ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی به عنوان مشکلی اساسی همراه با پیامدهای محیطی در بسیاری از نواحی، شناخته شده است (Galloway, Jones & Ingebritsen, 1999; Abidin et al., 2001; Amelung, Galloway, Bell, Zebker & Laczniak, 1999; Poland, 1984; Tolman & Poland, 1940). فرونشست، تهدیدات قابل توجهی برای زیرساخت‌ها، ساختمان‌ها و محیط‌زیست ایجاد می‌کند به طور مثال زیرساخت‌های حمل و نقل مانند راه آهن تایوان را تحت تأثیر قرار داده است (Hu & Chiu, 2023). فرونشست زمین به دلیل اضافه برداشت آب زیرزمینی در درهٔ مرکزی در کالیفرنیا، کنترل سیل و زیرساخت‌های مخازن آبی را تهدید می‌کند و بیانگر اهمیت نظارت و مدیریت فرونشست برای دسترسی به منابع آب در آینده می‌باشد (Jones, Farr, Liu & Miller, 2020). خاک دلتایی نرم در شهرهای جنوب شرقی آسیا با مشکلات فرونشست، تأثیر بر ساختمان‌ها، جاده‌ها و افزایش هزینه‌های ساخت‌وساز مواجه است که نیاز به نظارت بر آب‌های زیرزمینی و سکونت‌گاه‌ها یا تحلیل‌های عددی برای ارزیابی دارد (Giao, Saowiang & Anh, 2019). علاوه بر این، حفره‌های زیرزمینی ناشی از فرونشست می‌تواند منجر به عواقب فاجعه‌بار برای سازه‌ها شود که نیاز به روش‌های تقویت ژئوسنتتیک در کاهش این تأثیرات را دو چندان می‌کند (Al Heib, Hassoun, Emeriault, Villard & Farhat, 2021). تکنیک سری زمانی تداخل‌سنجی راداری این پتانسیل را دارد که از توسعه ابزارهای جدید و مؤثرتر برای نظارت و تجزیه و تحلیل سلامت سازه‌ها پشتیبانی کند و باعث کاهش هزینه‌ها شود. با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری می‌توان جابه‌جایی‌های مشکوک سازه‌های انسانی را در مقیاس زمانی ماهانه پایش کرد. علاوه بر این، دو ویژگی اصلی وجود دارد که تکنیک تداخل‌سنجی را برای جامعه علمی جذاب می‌کند. اولین مورد این است که یک نمایش دو بعدی با وضوح بالا از تغییر شکل در ۱۰ تا ۱۰۰ کیلومتر را ارائه می‌دهد. دوم دقت بالا (تا ۱ میلی‌متر در سال) در اندازه‌گیری تغییر شکل است (Hooper, Bekaert, Spaans & Arıkan, 2012). علاوه بر این، به داده‌های بایگانی شده تصاویر ماهواره راداری مورد نظر برای به دست آوردن اطلاعات تغییر شکل در گذشته دسترسی وجود دارد.

سلامت پل قدیمی آیلسفورد واقع در شهر کنت انگلستان را با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و رادار نفوذی زمینی مورد پایش قرار داده شد. نتایج بررسی با استفاده از رادار نفوذی زمینی (GPR) منجر به شناسایی گرهک‌های ساختاری موجود در سازه شد. نتایج مشاهدات یک دوره ۲۱ ماهه با استفاده از تکنیک InSAR، یک مطابقت آشکار بین روندهای فصلی جابه‌جایی پراکنشگرهای دائمی واقع در مجاورت پل و روند سیل ثبت شده توسط دو ایستگاه نزدیک به محل پل را نشان می‌دهد. روند چرخه‌ای جابه‌جایی‌های شناسایی‌شده، نشان می‌دهد که جابه‌جایی‌های رو به بالا و پایین پل با روند اشباع خاک در طول چرخه هیدرولوژیکی مطابقت دارد (Alani, Tosti, Ciampoli, Gagliardi & Benedetto, 2020). توانایی تکنیک پراکنشگرهای دائمی تداخل‌سنجی راداری (PS-InSAR) برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های پل هنگ‌کنگ - ژوهای - ماکائو (HZMB) با استفاده از ۸۶ تصویر Sentinel-1A در بازه

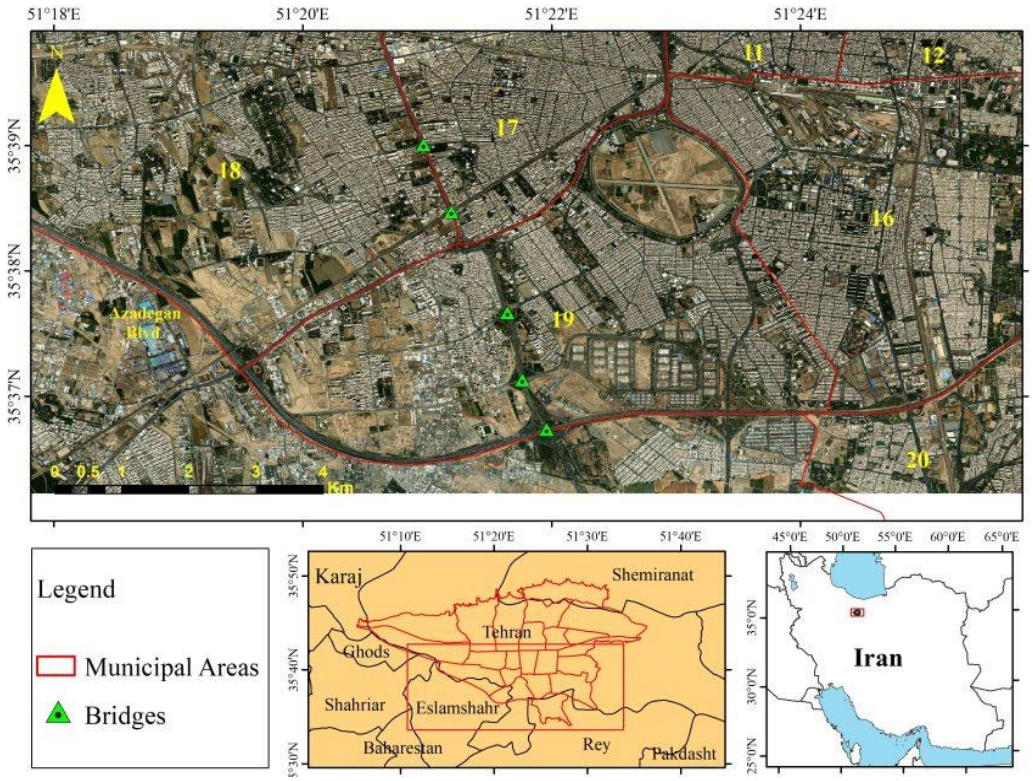
زمانی ۶ ژانویه ۲۰۱۸ تا ۲۷ نوامبر ۲۰۲۰ بررسی شد. نتایج نشان داد که فرونشست مداوم حدود ۱۰ میلی‌متر در سال، ۱۷ میلی‌متر در سال و ۱۴ میلی‌متر در سال به ترتیب در راهروی شمالی ترمینال مسافربری ژوهای - ماکائو، جزیرهٔ مصنوعی شرقی و ساختمان‌های ترمینال مسافربری هنگ‌کنگ نمایان است. نرخ فرونشست حاشیه جزیرهٔ مصنوعی غربی نسبت به قسمت مرکزی کمی بیشتر است. در همین حال، نقشه همبستگی دما نشان می‌دهد که تغییرات دوره‌ای ناشی از دما بر روی ساختمان‌ها، جاده‌ها و پل‌ها، تحت تأثیر اثر انبساط حرارتی رخ می‌دهد (Ma, Wu, Zhang & Au, 2024). تحقیقات پیشین، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی را طی سال‌های اخیر مهمترین علت پدیده فرونشست در آبخوان دشت تهران دانسته‌اند.

در پژوهشی که در خصوص بررسی فرونشست دشت تهران - ورامین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری انجام شد، نتایج نشان داد که میزان فرونشست زمین برای دورهٔ مطالعاتی ۲۰۰۳-۲۰۱۷ در دشت تهران - ورامین، در جنوب غرب از ۲۵ سانتی متر در سال، در نزدیکی فرودگاه امام خمینی از ۵ سانتی‌متر در سال و در شهرستان ورامین از ۲۲ سانتی‌متر در سال فراتر می‌رود. تجزیه و تحلیل جابه‌جایی‌های مشاهده شده همراه با اطلاعات به دست آمده از نقشه‌های زمین‌شناسی و سطح آب زیرزمینی در منطقه نشان داد که برداشت بیش از حد آب زیرزمینی علت اصلی تغییر شکل سطح است. طبق این پژوهش فرونشست دشت تهران- ورامین دو الگوی اصلی شامل جابه‌جایی بلندمدت در نتیجه کاهش سطح آب زیرزمینی در دهه‌های اخیر و تغییرات کوتاه‌مدت مربوط به تخلیه و تغذیه فصلی آب‌های زیرزمینی دارد (Haghighi & Motagh, 2019). رفتار فرونشست زمین در منطقهٔ غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل۱ و تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی بررسی شد. نتایج، جابه‌جایی سالانه ۱۵ سانتی‌متری را در جنوب منطقه مورد مطالعه منتهی به دشت‌های شهریار و تهران نشان داد اما جابه‌جایی تنها محدود به مناطق دشتی و غیر شهری نبوده بلکه به مناطق صنعتی و شهری نیز گسترش یافته است. به طوری که در مناطق دارای واحدهای صنعتی و مسکونی طی دو سال، میزان جابه‌جایی تجمعی ۸ تا ۱۳ سانتی‌متر بوده است. در محورهای ارتباطی نظیر بزرگراه فتح میزان جابه‌جایی بالای ۴ سانتی‌متر در سال محاسبه شده است. همچنین بررسی الگوی فرونشست بیانگر این است که عمده بردار جابه‌جایی را حرکت قائم تشکیل می‌دهد و میزان جابه‌جایی افقی بسیار پایین می‌باشد (Maghsoudi, Amani & Ahmadi, 2019).

در مطالعه‌ای با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و تصاویر Sentinel-1A برای سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ اقدام به بررسی فضایی - زمانی فرونشست زمین در دشت تهران شد. نتایج نشان داد که حداکثر نرخ فرونشست بر روی دشت تهران در طول دورهٔ مورد مطالعه تقریباً ۲۰ سانتی‌متر در سال است که زبانه‌های فرونشست از جنوب و جنوب غرب به داخل شهر تهران که دارای خاک ریزدانه است در حال گسترش می‌باشد. حداکثر نرخ جابه‌جایی افقی مطلق حدود ۸ سانتی‌متر در سال در جهت شرق به غرب محاسبه شد. همچنین نتایج حاکی از کاهش میزان فرونشست در سال‌های اخیر بوده است این امر می‌تواند ناشی از فرآیند تغذیهٔ آب زیرزمینی و افزایش سطح آب در نتیجهٔ افزایش نرخ بارندگی از سال ۲۰۱۸ باشد (Babaee, Khalili, Chirico, Sorrentino & Di Martire, 2024). تحقیقات پیشین دربارهٔ فرونشست تهران غالباً به تهیه نقشه فرونشست و تعیین حدود آن منتهی شده‌اند و در خصوص بررسی میزان تأثیر فرونشست بر سازه‌ها و زیرساخت‌های شهری تا اکنون تحقیقی انجام نشده است. در این تحقیق با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و روش پراکنشگرهای دائمی اقدام به بررسی رفتار پل‌های جاده‌ای سطح شهر تهران در ارتباط با پهنهٔ فرونشست شده است و در پی آن هستیم تا بررسی کنیم که فرونشست تا چه میزان بر پل‌هایی که در محدودهٔ فرونشست قرار گرفته‌اند تأثیر گذاشته است.

منطقهٔ مورد مطالعه

شهر تهران با جمعیت بیش از ۹ میلیون نفر یکی از کلان‌شهرهای جهانی و بزرگترین شهر ایران می‌باشد. نقش سیاسی شهر تهران و قرار گرفتن به عنوان پایتخت، بر اهمیت این شهر می‌افزاید. موقعیت مطلق مکانی این شهر از ۵۱ درجه و ۵ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۵ دقیقه طول شرقی و از ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۹ دقیقه عرض شمالی می‌باشد این شهر از نظر تقسیمات شهری به ۲۲ منطقهٔ شهرداری تقسیم می‌شود. شکل ۱، شهر تهران و موقعیت پل‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این تحقیق ۵ پل جاده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است که در جنوب غربی شهر تهران و در مناطق ۱۷، ۱۸ و ۱۹ قرار دارند. این محدوده از شهر تهران منطبق بر دشت آبرفتی با رسوبات آبرفتی دوره کواترنری می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه (جنوب غربی کلانشهر تهران)

Fig.1. Location of the study area (Southwest of Metropolis of Tehran)

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از تصاویر راداری تک منظر پیچیده (SLC) ماهواره سنتینل ۱ در پلاریزاسیون VV در بازه زمانی سال ۲۰۲۲ استفاده شده است. هدف از انتخاب سال ۲۰۲۲ انطباق زمانی با آخرین داده‌های تراز آب زیرزمینی موجود برگرفته از آب منطقه‌ای تهران می‌باشد. به منظور دست یابی به بهترین نتایج از تصاویر با کمترین فاصله زمانی ممکن (۱۲ روز) استفاده شد. تعداد تصاویر انتخاب شده ۲۸ قطعه می‌باشد. تصاویر در حالت پایین‌گذر (Descending) بوده و از مسیر ۳۵ انتخاب شده‌اند. در جدول ۱ مشخصات ماهواره راداری سنتینل ۱ نمایش داده شده است و در جدول ۲، تصاویر راداری مورد استفاده و مشخصات آن‌ها آورده شده است. تصاویر مورد استفاده از وب سایت تسهیلات فضایی آلاسکا (ASF) تهیه شده است. برای انجام تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی

راداری از حالت IW تصاویر سنتینل ۱ استفاده شده است و با توجه به موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه نوار IW2 برای انجام پردازش انتخاب شد. برای حذف تأثیرات توپوگرافی از DEM ۳۰ متری SRTM سازمان فضایی آمریکا استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات عمومی تصاویر راداری ماهواره سنتینل ۱

Table 1- General characteristics of Sentinel-1 satellite radar images

دوره بازگشت (روز) Return period (days)	قدرت تفکیک Resolution	حالت تصویربرداری Shooting mode	طول موج Wavelength	فرکانس Frequency	ماهواره Satellite
12	Centimeter	Wide Interferometry (IW)	5.66 cm Band C	5.4 GHz	Sentinel 1A

جدول ۲- مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده از ماهواره سنتینل۱

Table 2- Characteristics of Sentinel-1 satellite radar images used in this research

خط مبنای زمانی (روز) Time baseline (day)	خط مبنای مکانی (متر) Spatial baseline (meter)	مسیر عبور Passage Way	نوار Tape	نوع تصویر Image Type	مسیر Pass	تاریخ تصویر Image Date	ردیف Num.
-336	-57	Descending	IW2	SLC	35	2022/01/11	1
-324	-39	Descending	IW2	SLC	35	2022/01/23	2
-312	-71	Descending	IW2	SLC	35	2022/02/04	3
-300	-24	Descending	IW2	SLC	35	2022/02/16	4
-288	-21	Descending	IW2	SLC	35	2022/02/28	5
-276	-105	Descending	IW2	SLC	35	2022/03/12	6
-264	-65	Descending	IW2	SLC	35	2022/03/24	7
-252	-55	Descending	IW2	SLC	35	2022/04/05	8
-240	-24	Descending	IW2	SLC	35	2022/04/17	9
-228	-24	Descending	IW2	SLC	35	2022/04/29	10
-216	-86	Descending	IW2	SLC	35	2022/05/11	11
-204	-43	Descending	IW2	SLC	35	2022/05/23	12
-192	-25	Descending	IW2	SLC	35	2022/06/04	13
-180	-104	Descending	IW2	SLC	35	2022/06/16	14
-168	33	Descending	IW2	SLC	35	2022/06/26	15
-144	-87	Descending	IW2	SLC	35	2022/07/22	16
-132	-41	Descending	IW2	SLC	35	2022/08/03	17
-120	-37	Descending	IW2	SLC	35	2022/08/15	18
-108	-19	Descending	IW2	SLC	35	2022/08/27	19
-96	80	Descending	IW2	SLC	35	2022/09/08	20
-72	-40	Descending	IW2	SLC	35	2022/10/02	21
-60	-103	Descending	IW2	SLC	35	2022/10/14	22
-48	49	Descending	IW2	SLC	35	2022/10/26	23
-36	-88	Descending	IW2	SLC	35	2022/11/07	24
-24	-44	Descending	IW2	SLC	35	2022/11/20	25
-12	-123	Descending	IW2	SLC	35	2022/12/01	26
0	0	Descending	IW2	SLC	35	2022/12/13	27
12	39	Descending	IW2	SLC	35	2022/12/25	28

هدف اصلی تداخل‌سنجی راداری، استخراج میزان دگرشکلی از فاز اندازه‌گیری شده کلی با حذف کردن یا کمینه کردن اثر دیگر مؤلفه‌ها است. DInSAR فقط امکان تشخیص اختلاف فاز بین دو تصویر SAR را می‌دهد و در حذف تأثیرات اتمسفری توانایی ندارد. برای رفع این محدودیت تکنیک‌های PSInSAR (Ferretti, Prati & Rocca, 2002) و Small Baseline (خط مبنای کوچک) (Berardino, Fornaro, Lanari & Sansosti, 2002) ابداع شدند. نوآوری اصلی رویکردهای PSInSAR، امکان تجزیه و تحلیل نقاط خاص روی سطح زمین (یعنی پراکنشگرها) و نظارت بر سری زمانی تغییر شکل آن‌ها است. پراکنشگرهای پایدار با یک دامنه پایدار

و یک فاز منسجم در کل مجموعه تصاویر در یک مجموعه داده مشخص می‌شوند (Ferretti et al., 2002). پراکنشگرها معمولاً ویژگی‌های ثابت روی زمین مانند سازه‌ها و زیرساخت‌های دست‌ساز (مانند راه آهن، ساختمان‌ها، پل‌ها، برج‌ها)، رخنمون‌های صخره‌ای و هر ویژگی دائمی دیگری هستند که سیگنال پایداری را به ماهواره منعکس می‌کنند. مراحل تکنیک PS-InSAR به شرح زیر است (Colesanti, Ferretti, Prati & Rocca, 2003):

الف) تجزیه و تحلیل آماری دامنه‌های بازگشت طول موج، پیکسل به پیکسل انجام می‌شود تا شاخص پایداری در طول زمان برای هر پیکسل محاسبه شود.

ب) شناسایی پراکنشگرهای دائمی منتخب (PSCs). اینها پیکسل‌هایی با مقدار شاخص پایداری هستند که از یک آستانهٔ ثابت فراتر می‌رود.

ج) محاسبه فاز تداخل‌سنجی (Δφi) برای هر PSC، در هر تداخل نما.

د) شناسایی و حذف سهم فاز اتمسفر، اثرات مداری و سایر نویزها از فاز تداخل‌سنجی.

در نتیجهٔ فرآیند فوق، بازتابنده‌های پایدار (PSها) را می‌توان در منطقه مورد بررسی شناسایی کرد. این مزیت امکان اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطح زمین با دقت میلی‌متری را فراهم می‌کند (Colesanti et al., 2005). در پایان فرآیند، روند تکامل جابه‌جایی را می توان برای هر PS بررسی کرد یا یک نقشه سرعت متوسط را می‌توان برای ارائه یک نمای کلی از میانگین حرکت زمین در کل منطقهٔ مورد نظر تولید کرد. این مجموعه داده با استفاده از تکنیک PS با استفاده از نرم‌افزارهای GMTSAR و Stamps پردازش شدند. پردازش InSAR، شامل انتخاب نوار مورد نظر از تصویر، پردازش‌های اولیه، برش تصویر و تشکیل تداخل‌نما با استفاده از نرم‌افزار GMTSAR انجام شد و پردازش PS، از جمله انتخاب و بازیابی PS و تهیه نمودارهای سری زمانی از پل‌ها با استفاده از نرم افزار Stamps انجام شد. کل مراحل پردازش در شکل ۲، آورده شده است.

در این پژوهش به منظور مطالعهٔ تأثیر فرونشست بر سازه‌های شهری، ۵ پل جاده‌ای در مناطق ۱۷، ۱۸ و ۱۹ در جنوب غرب شهر تهران مورد بررسی قرار گرفته‌اند. موقعیت نسبی و برخی از ویژگی‌های این پل‌ها در جدول ۳ آمده است.

در این مطالعه با استفاده از داده‌های چاه‌های پیزومتری محدوده مورد مطالعه در بازهٔ زمانی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ استفاده شد. این داده‌ها از سازمان آب منطقه‌ای تهران تهیه شده‌اند. مقدار تجمعی استاندارد شده برای سطح آب زیرزمینی هر چاه با استفاده از رابطه (۱) به دست آمد. که در آن WLt سطح آب زیرزمینی در یک زمان مشخص، $\overline{WL}$ میانگین سطح آب زیرزمینی در کل دوره مورد مطالعه و WLsd انحراف معیار سطح آب زیرزمینی در کل دوره مطالعه می‌باشد.

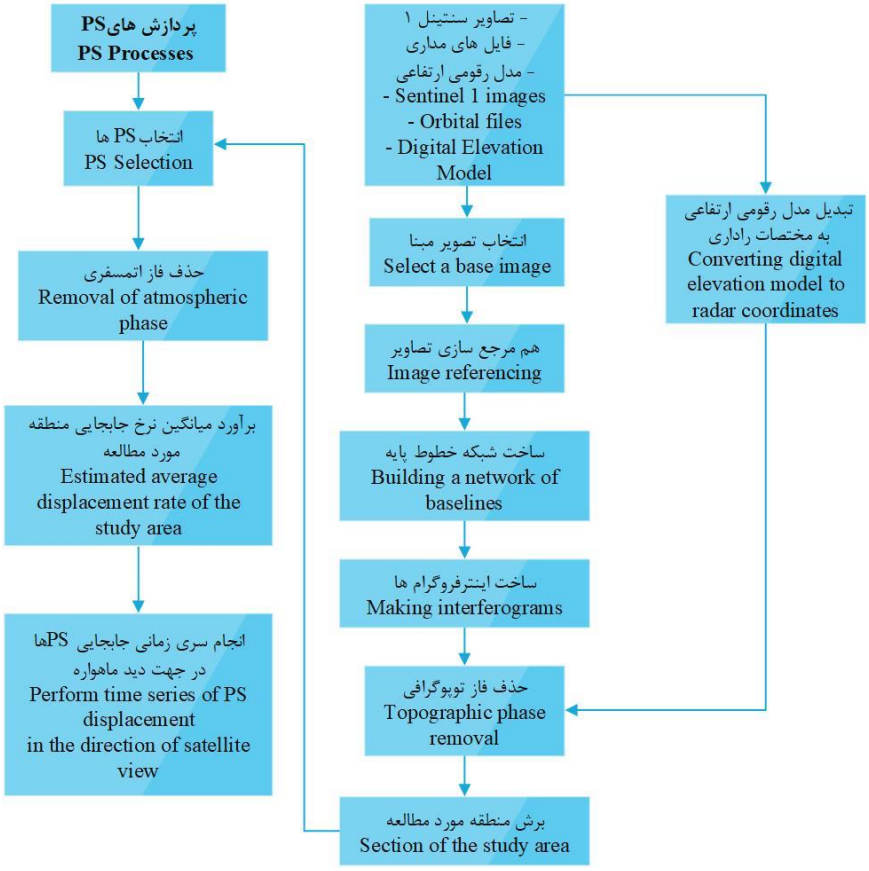
$$WLS = \sum \frac{WLt - \overline{WL}}{WLsd} \qquad (۱)$$

تهیه نقشه‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS انجام شد. به منظور مشاهده مستقیم اثرات فرونشست زمین بر پل‌های مورد مطالعه، در شهر تهران اقدام به انجام بازدید میدانی و عکس‌برداری از برخی تغییرات پل‌ها گردید.

جدول ۳- موقعیت و ویژگی‌های پل‌های مورد مطالعه در شهر تهران

Table 3- Location and characteristics of the studied bridges in Tehran

شماره پل Bridge Number	موقعیت نسبی Relative position	طول پل Bridge length (m)	عرض پل Bridge width (m)	ارتفاع عرشه پل Bridge deck height (m)
1	تقاطع بزرگراه آیت الله سعیدی و بلوار برادارن بهرامی در جهت شرقی-غربی The intersection of Ayatollah Saeedi Highway and Baradaren Bahrami Boulevard in the east-west direction	200	22	7
2	به منظور عبور راه آهن تهران از روی بزرگراه آیت الله سعیدی در مسیر شرقی-غربی In order for the Tehran Railway to pass over the Ayatollah Saeedi Highway on the east-west route	50	15	7.5
3	تقاطع بزرگراه کاظمی و بلوار شکوفه در مسیر شرقی-غربی The intersection of Kazemi Highway and Shokoofeh Boulevard on the east-west route	250	24	7
4	تقاطع بزرگراه کاظمی و بلوار شقایق در مسیر شرقی-غربی The intersection of Kazemi Highway and Shaghayegh Boulevard on the east-west route	200	34	7
5	تقاطع بلوار کاظمی و بزرگراه آزادگان در مسیر شمال به جنوب The intersection of Kazemi Boulevard and Azadegan Highway on the north-south route	110	34	7

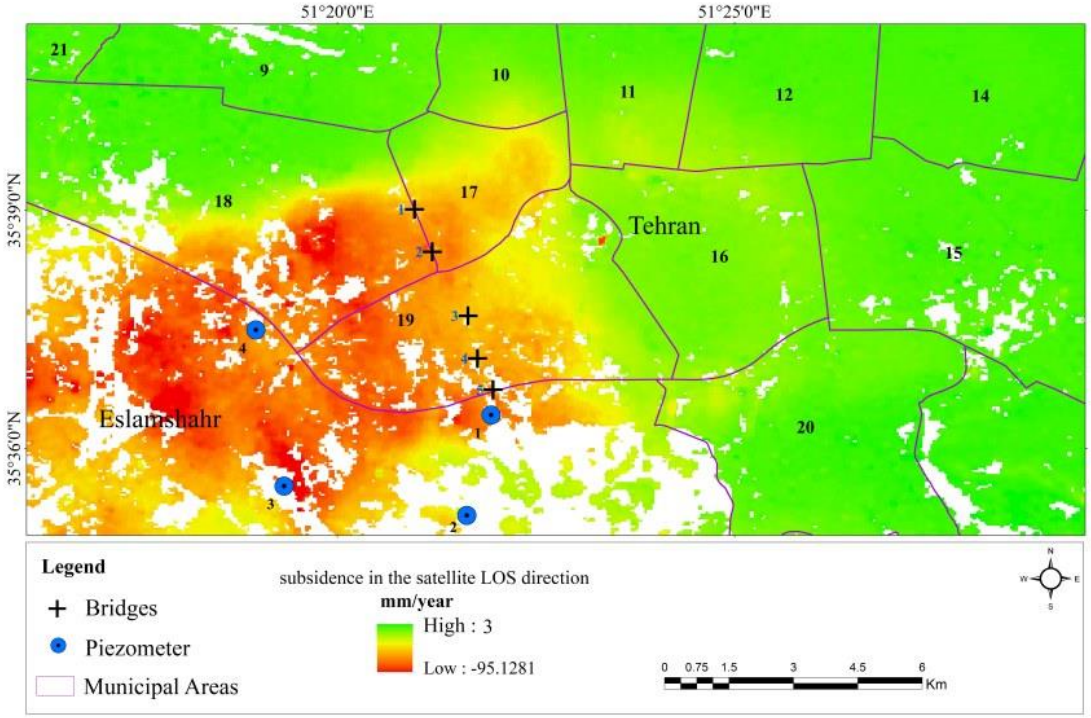


شکل ۲- مراحل انجام پردازش روش PS-InSAR

Fig.2. Processing Steps of the PS-InSAR Method

نتایج و بحث

نتایج پردازش راداری نشان‌دهندهٔ نرخ جابه‌جایی بین ۳+ تا ۹۵- میلیمتر در سال در راستای خط دید ماهواره برای سال ۲۰۲۲ است (شکل ۳). با توجه به نقشه جابه‌جایی به دست آمده در این تحقیق، در بازهٔ زمانی مورد مطالعه، عمدهٔ فرونشست شهر تهران در جنوب غربی این شهر به وقوع پیوسته است که شامل مناطق شهرداری ۱۷، ۱۸ و ۱۹ می‌باشد. در واقع مرکز فرونشست در دشت جنوبی تهران قرار دارد و به سمت شهر تهران گسترش پیدا کرده است. بیشینهٔ فرونشست مربوط به جنوب منطقهٔ ۱۸ و قسمت غربی منطقه ۱۹ به میزان ۷۰- میلی‌متر در سال می‌باشد. موقعیت پل‌های مورد مطالعه و پیزومترهای نزدیک به موقعیت آن‌ها در روی نقشه فرونشست مشخص گردیده است. هر کدام از پل‌ها و پیزومترها در نقشه با شماره مشخص شده‌اند که نتایج آنالیز راداری و سطح آب آن‌ها در ادامه توضیح داده خواهد شد.

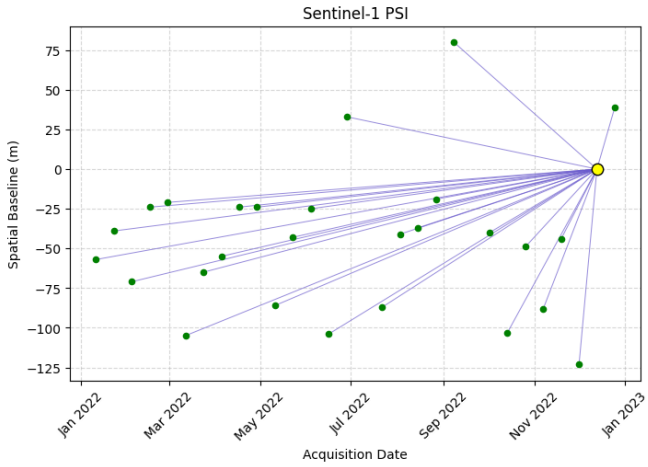


شکل ۳- نقشهٔ میزان فرونشست محدودهٔ مورد مطالعه سال ۲۰۲۲

Fig.3. Map of land subsidence in the study area for 2022

نتایج حاصل از پردازش پراکنشگرهای دائمی

با توجه به خط مبنای زمانی و مکانی تصاویر نسبت به تصویر مرکزی (۲۰۲۲/۱۲/۱۳)، شبکه تداخل‌نگارها ایجاد شد که در شکل ۴ نشان داده می‌شود. به منظور بررسی میزان جابه‌جایی پل‌ها در اثر فرونشست بر روی عرشه هر پل، ۴ پراکنشگر دائمی (PS) انتخاب شده است که موقعیت آن‌ها بر روی هر پل در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۴- شبکه تداخل نگارها با توجه به موقعیت زمانی و مکانی آن‌ها نسبت به تصویر مرکزی

Fig.4. Interferogram Network According to Their Temporal and Spatial Relationship to the Master Image

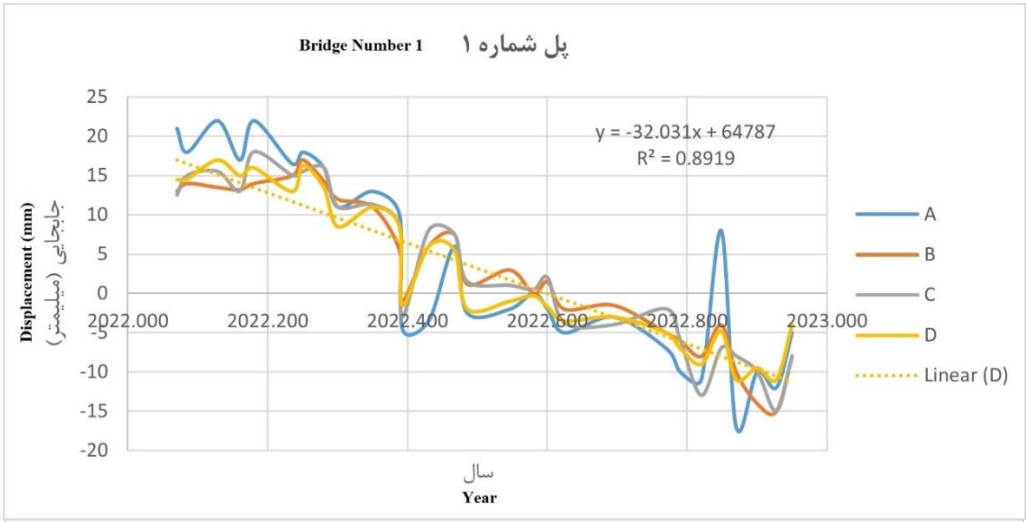


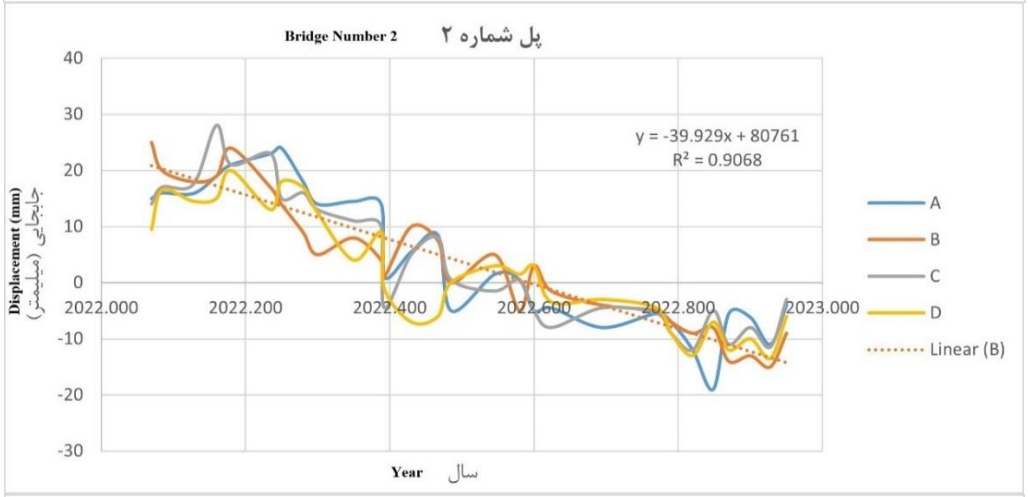
شکل ۵- موقعیت پراکنشگرهای دائمی انتخاب شده بر روی عرشه پل‌های مورد مطالعه جنوب غربی شهر تهران

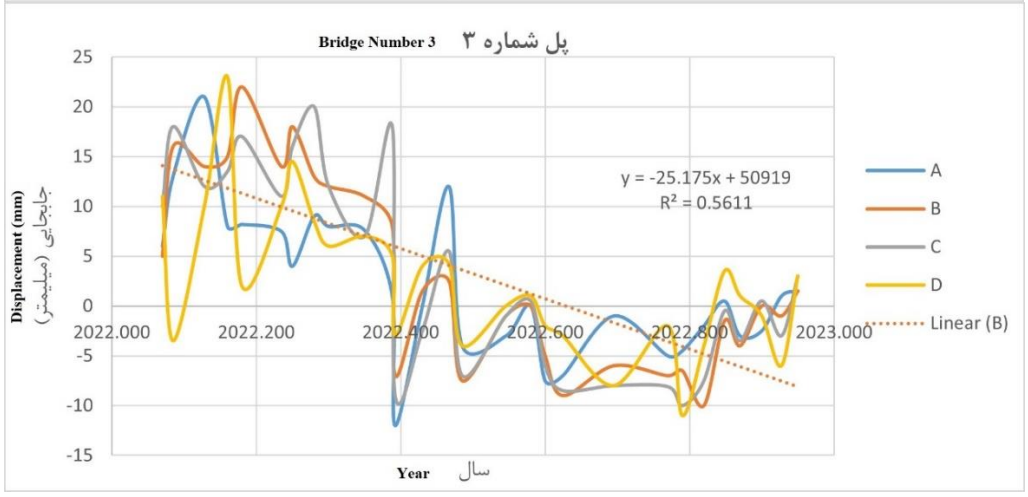
Fig.5. Location of selected permanent scatterer on the decks of the sampeled bridges in southwest Tehran

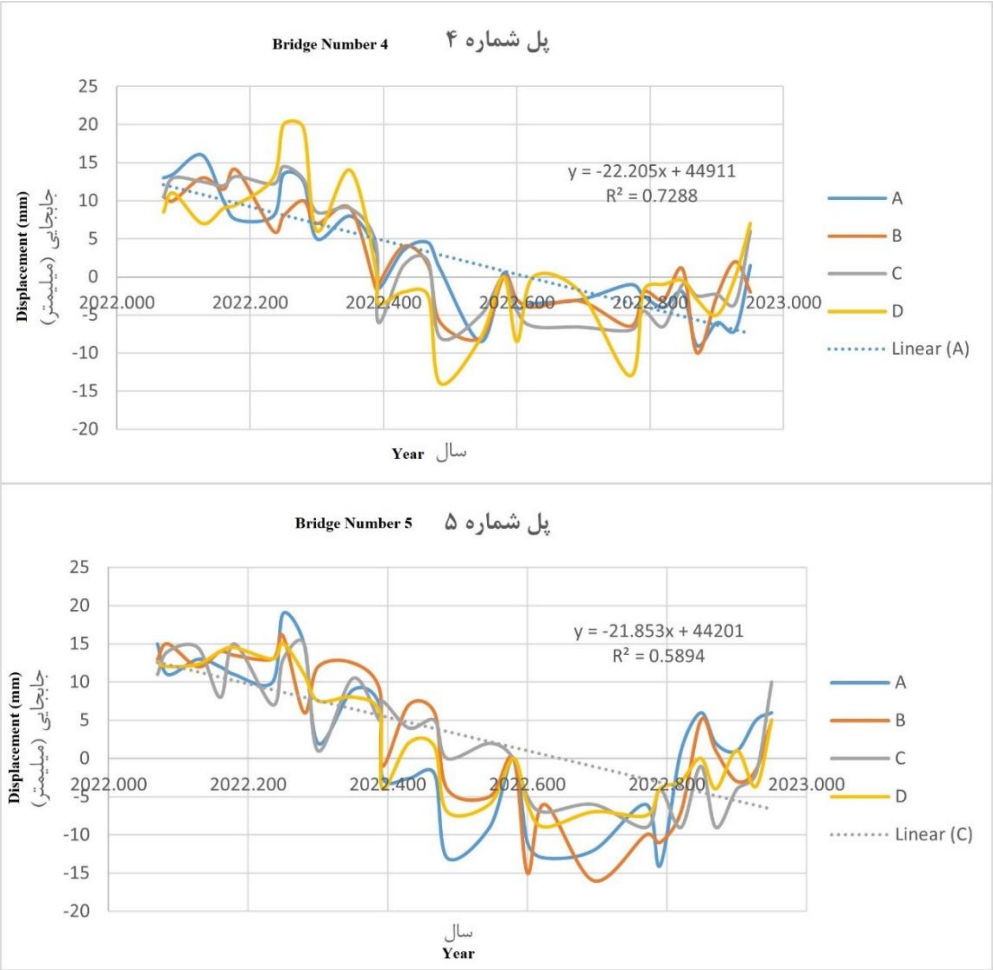
شکل ۶، نمودارهای حاصل از پراکنشگرهای دائمی واقع در عرشه پل‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در پل شماره ۱، میزان تجمعی تغییرات قائم عرشه پل به میزان ۲.۵ تا ۳.۵ سانتیمتر در طول دوره مورد مطالعه (۲۰۲۲) می‌باشد. با توجه به نوسانات هر نمودار، رفتار هر ۴ نقطه بیانگر روند حاکم نزولی در عرشه پل می‌باشد. بازدید میدانی از پل، گسیختگی محسوسی را در اوضاع پل نشان نمی‌دهد و تغییرات بسیار ناچیز و در حد وجود شکاف در دیواره و روکش آسفالتی عرشه پل می‌باشد که تا حد زیادی مربوط به چند تیکه بودن سازه پل و تغییرات سازه در محل اتصالات آن می‌باشد. میزان تجمعی تغییرات قائم عرشه پل شماره ۲، به میزان ۳.۵ تا ۴.۵ سانتیمتر در طول یک سال می‌باشد. رفتار هر ۴ نقطه بیانگر روند حاکم فرونشست در عرشه پل می‌باشد. به دلیل پوشیده بودن عرشه پل با سنگریزه‌های پایهٔ خطوط راه‌آهن و قرار گرفتن دیواره‌های جانبی پل در درون زمین امکان مطالعهٔ اثرپذیری سازه از فرونشست به روش مشاهدهٔ مستقیم میسر نبود. میزان تجمعی تغییرات قائم عرشه پل شماره ۳، به میزان ۳.۵ تا ۴.۵ سانتیمتر در طول یک سال می‌باشد. با توجه به اینکه رفتار هر ۴ نقطه بیانگر روند حاکم فرونشست در عرشه پل می‌باشد اما شاهد یک نشست ناگهانی در عرشه پل از ماه چهارم سال ۲۰۲۲ می‌باشیم که به خوبی در نمودار C مشخص است. بازدید میدانی از پل مورد نظر بیانگر نشست محسوس در پایه‌های پل به خصوص در سمت غربی آن می‌باشد. در این قسمت جداشدگی دیواره پل به عرض ۵ سانتی‌متر، فرو ریختن بخشی از نمای دیواره پل، اختلاف سطح محسوس در جداول پایه پل و خالی شدن بخش زیرین جداول (به عمق ۲۰ سانتیمتر) و همچنین فرورفتن قسمت میانی پله‌های حاشیه پل اتفاق افتاده است که در تصاویر شکل ۷ نمایان است. میزان تجمعی تغییرات قائم عرشه پل شماره ۴، به میزان ۲.۳ تا ۳.۷ سانتیمتر در طول یک سال مورد مطالعه (۲۰۲۲) می‌باشد. رفتار هر ۴ نقطه بیانگر روند حاکم فرونشست در عرشه پل می‌باشد. در پایهٔ غربی این پل، در محل اتصال عرشه و پایه شکافی به عرض ۶ سانتیمتر ایجاد شده است که در کل دیواره محسوس است و بزرگتر ار حد معمول فاصله موجود بین اتصالات پل می‌باشد. میزان تجمعی تغییرات قائم عرشه پل شماره ۵، به میزان ۲.۵ تا ۳.۴ سانتیمتر در طول سال می‌باشد. با توجه به رفتار هر ۴ نقطه می‌توان روند فرونشست را به وضوح دید اما در انتهای نمودار، روند بالاآمدگی در نمودار مشخص است که می‌تواند ناشی از تأثیرپذیری زیاد سازه از تغییرات سطح آب زیرزمینی باشد. بازشدگی دیواره و ریزش نما از تغییرات محسوس در پل شماره ۵ بود.

نتایج مقدار تجمعی استاندارد شده پیزومترهای موجود در محدوده فرونشست همگی حاکی از افت شدید آب زیرزمینی از سال ۱۳۹۲ به بعد دارند (شکل۸). به منظور بررسی میزان ارتباط تغییرات سطح آب زیرزمینی با تغییرات ارتفاعی پل‌ها، اقدام به تعیین میزان همبستگی نمودار سری زمانی نقاط PS با تغییرات سطح آب پیزومترها برای یک دوره زمانی یکسان (سال ۲۰۲۲) شد. به این منظور تغییرات نقاط PS پل شماره ۲ با تغییرات سطح آب پیزومتر شماره ۴ و تغییرات نقاط PS پل شماره ۵ با تغییرات سطح آب پیزومتر شماره ۱ مورد مقایسه قرار گرفت. برای نمودار هر یک از پراکنشگرهای دائمی و نمودار تغییرات سطح آب پیزومترها مقدار تجمعی استاندارد شده محاسبه گردید. در شکل ۹ و ۱۰، نمودارهای سری زمانی مربوط به هر پل در کنار نمودار نزدیکترین پیزومتر به پل مربوطه آمده است. نتایج بیانگر میزان همبستگی بالای پیزومترها و پراکنشگرهای دائمی می‌باشد (جدول ۴). میزان سطح معناداری داده‌ها با استفاده از آزمون T برابر با ۰/۳۷ بود. از همبستگی بالای این دو می‌توان فهمید که سطح زمین به شدت متأثر از تغییرات سطح آب زیرزمینی است و بالا و پایین رفتن سطح آب آبخوان، زمین بالای خود را به صورت مستقیم متاثر خواهد کرد. با این اوصاف می‌توان دریافت که برداشت بیش از حد از آب زیرزمینی و افت مداوم سطح آب آن می‌تواند به سرعت سبب فرونشست زمین شود و اثرات جبران‌ناپذیری بر سازه‌های انسان‌ساخت سطح زمین بگذارد.


Bridge Number 1
پل شماره ۱
y = -32.031x + 64787
R² = 0.8919
Displacement (mm)
جابجایی (میلیمتر)
Year
سال
A
B
C
D
Linear (D)


Bridge Number 2
پل شماره ۲
y = -39.929x + 80761
R² = 0.9068
Displacement (mm)
جابجایی (میلیمتر)
Year
سال
A
B
C
D
Linear (B)


Bridge Number 3
پل شماره ۳
y = -25.175x + 50919
R² = 0.5611
Displacement (mm)
جابجایی (میلیمتر)
Year
سال
A
B
C
D
Linear (B)



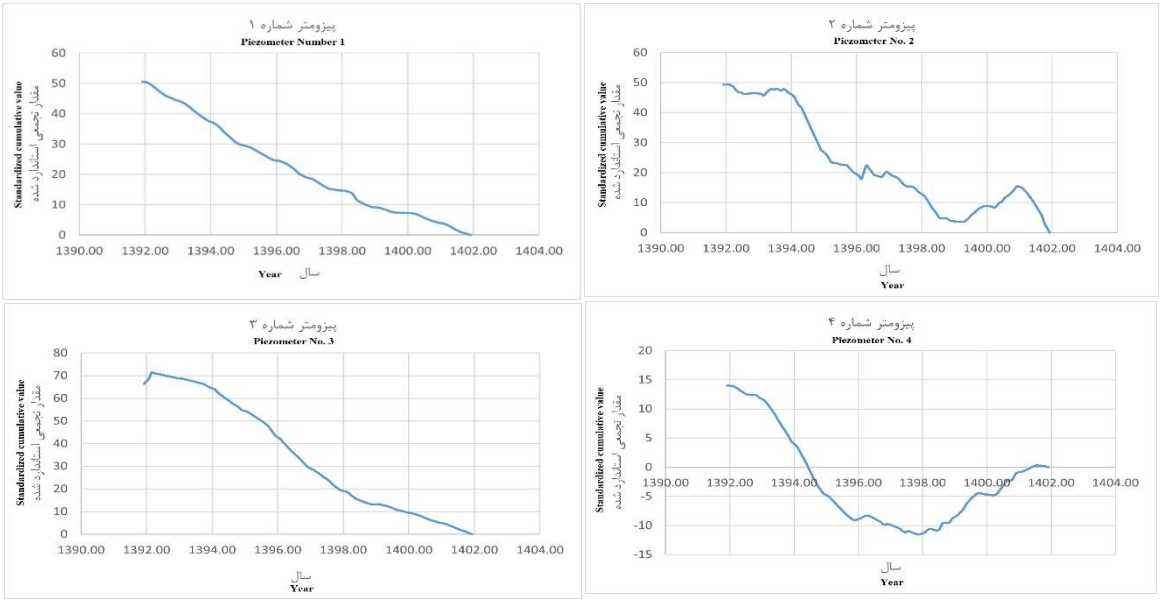
شکل ۶- نمودارهای حاصل از رفتار پراکنشگرهای دائمی واقع در عرشه پل‌های مورد مطالعه

Fig.6. Time Series of Permanent Scatterer Behavior on the Decks of Studied Bridges



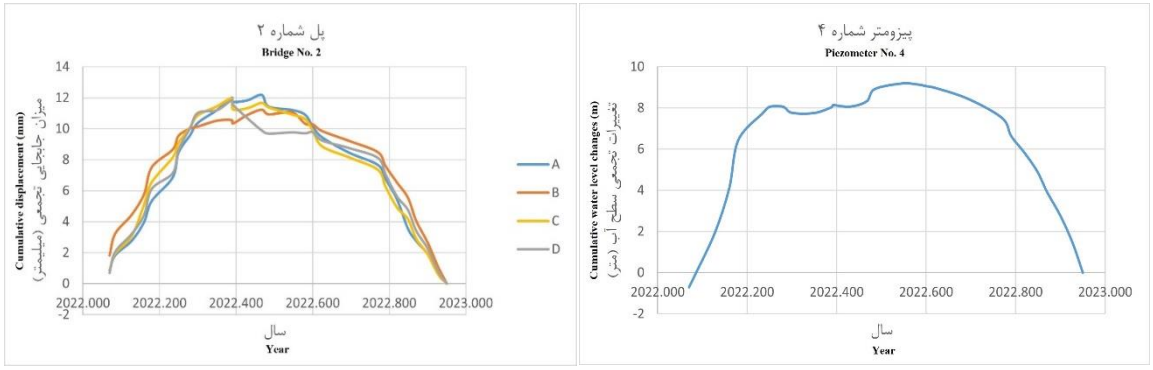
شکل ۷- تصاویر مربوط به تأثیرات فرونشست بر پل شماره ۳ (تقاطع بزرگراه کاظمی و بلوار شکوفه)

Fig.7. Images Showing the Impacts of Subsidence on Bridge No. 3 (Intersection of Kazemi Expressway and Shokoofeh Boulevard)



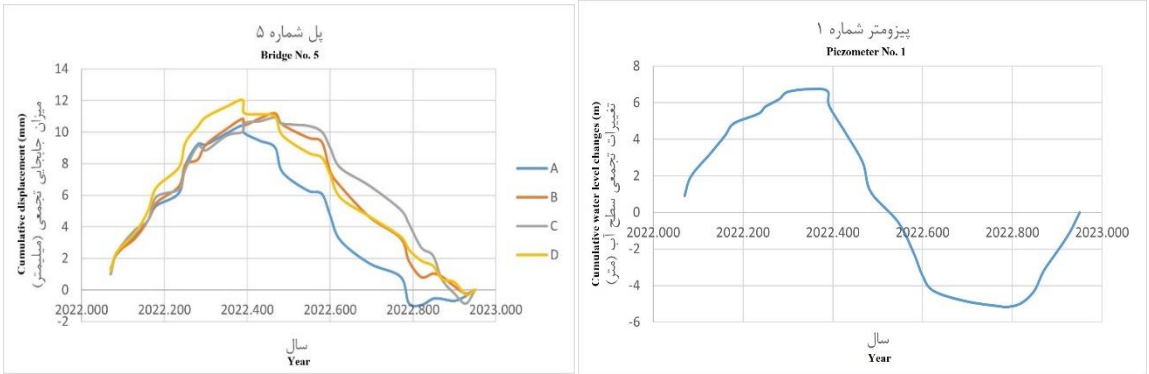
شکل ۸- مقدار تجمعی استاندارد شده سطح آب زیرزمینی پیزومترها در دوره زمانی ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۱

Fig. 8. Standardized Cumulative Groundwater Levels of Piezometers for the Period 2013–2022



شکل ۹- نمودار مقدار تجمعی استاندارد شده پراکنشگرهای دائمی (PS) پل ۲ و پیزومتر شماره ۴

Fig.9. Standardized cumulative value diagram of permanent scatterers (PS) of Bridge 2 and piezometer No. 4



شکل ۱۰- نمودار مقدار تجمعی استاندارد شده پراکنشگرهای دائمی (PS) پل ۵ و پیزومتر شماره ۱

Fig.10. Standardized cumulative value diagram of permanent scatterers (PS) of Bridge 5 and piezometer No. 1

جدول ۴- همبستگی پراکنشگرهای دائمی روی پل‌ها با سطح آب پیزومترها

Tabel 4- Correlation of permanent scatterer on bridges with piezometer water levels

همبستگی پل شماره ۵ Correlation of Bridge No. 5				همبستگی پل شماره ۲ Correlation of Bridge No. 2				
D	C	B	A	D	C	B	A	
*	*	*	*	0.936	0.928	0.957	0.922	پیزومتر ۴ Piezometer 4
0.655	0.423	0.562	0.794	*	*	*	*	پیزومتر ۱ Piezometer 1

نتیجه‌گیری

نتایج پردازش راداری نشان‌دهندهٔ نرخ جابه‌جایی بین ۳+ تا ۹۵- میلیمتر در سال در راستای خط دید ماهواره است. در واقع مرکز فرونشست در دشت جنوبی تهران قرار دارد و به سمت جنوب‌غربی شهر تهران گسترش پیدا کرده است. بیشینهٔ فرونشست مربوط به جنوب منطقه ۱۸ و قسمت غربی منطقه ۱۹ به میزان ۷۰- میلی‌متر در سال می‌باشد که با تحقیقات حقیقی و معتق (Haghighi & Motagh, 2019) و بابایی و همکاران (Babaee et al., 2024) از نظر مکانی مطابقت دارد. نتایج بررسی پراکنشگرهای دائمی انتخاب شده بر روی عرشه پل‌ها بیانگر تأثیرپذیری از فرونشست زمین در سال ۲۰۲۲ می‌باشد. میزان جابه‌جایی و پایین رفتن عرشه پل‌ها در اثر فرونشست حدود ۲.۳ تا ۴.۵ سانتیمتر در سال بوده است. انجام بازدید میدانی از پل‌های مورد مطالعه حاکی از تأثیرپذیری غالب پل‌ها از فرونشست زمین به شکل بازشدگی شکاف دیواره پل و ترک‌خوردگی آسفالت عرشه پل می‌باشد. در این میان، پل شماره ۳ به خوبی اثرات فرونشست زمین را نشان می‌دهد این پل که در تقاطع بزرگراه کاظمی و بلوار شکوفه قرار دارد در پایه سمت غربی آن نشست محسوس نمایان است. در این قسمت چاله به عمق ۲۰ سانتیمتر ایجاد شده، نمای دیواره پل دچار ریزش شده، پله‌های کناری پل دچار فرورفتگی شدند و جدول‌های کناره پل به سمت بیرون انحنا پیدا کرده‌اند.

نتایج مقدار تجمعی استاندارد شدهٔ پیزومترهای موجود در محدودهٔ فرونشست همگی حاکی از افت شدید آب زیرزمینی از سال ۱۳۹۲ به بعد دارند. نتایج حاصل از بررسی ارتباط تغییرات سطح آب زیرزمینی با تغییرات ارتفاعی پل‌ها بیانگر میزان همبستگی بالای ارتفاع سطح آب پیزومترها با تغییرات پراکنشگرهای دائمی می‌باشد. از همبستگی بالای این دو می‌توان فهمید که سطح زمین به شدت متأثر از تغییرات سطح آب زیرزمینی است و بالا و پایین رفتن سطح آب آبخوان، زمین بالای خود را به صورت مستقیم متأثر خواهد کرد. با این اوصاف می‌توان دریافت که برداشت بیش از حد از آب زیرزمینی و افت مداوم سطح آن نقش مستقیمی در فرونشست زمین در جنوب غربی تهران دارد که می‌تواند اثرات جبران‌ناپذیری بر سازه‌های انسان‌ساخت در این محدوده بگذارد. رفتار پراکنشگرهای دائمی انتخاب شده بر روی پل‌ها نشان می‌دهد که پل‌ها علاوه بر متأثر شدن از روند طولانی مدت فرونشست ناشی از افت سطح آب زیرزمینی، به شدت متأثر از نوسانات کوتاه مدت آن نیز هستند به طوری که بالاآمدن سطح آب زیرزمینی باعث روند صعودی در نمودار پراکنشگرهای دائمی شده است به طوری‌که با پژوهش الانی و همکاران (Alani et al., 2020)، در پایش سلامت پل قدیمی آیلسفورد واقع در شهر کنت انگلستان با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری مطابقت دارد که نشان داده شده است که جابه‌جایی‌های رو به بالا و پایین پل با روند اشباع خاک در طول چرخهٔ هیدرولوژیکی مطابقت دارد. به نظر می‌رسد روش PS-InSAR بهترین روش برای بررسی تغییرات نامحسوس سازه‌های عظیم شهری در بلندمدت بدون نیاز به نصب دستگاه‌های گران قیمت و با هزینه زیاد نگهداری می‌باشد. دسترسی به آرشیو گذشته با توجه به ماهواره راداری انتخاب شده، دقت بالا در حد میلی‌متر و پردازش تصاویر به صورت سری زمانی می‌تواند مسئولان شهری را در بررسی رفتار سازه‌های مهم در مناطق متأثر از فرونشست یاری دهد تا بتوانند در مناطق بحرانی در سریع‌ترین زمان، اقدام به تصمیم‌گیری کنند.

References

Abidin, H. Z., Djaja, R., Darmawan, D., Hadi, S., Akbar, A., Rajiyowiryono, H., ... & Subarya, C. (2001). Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its geodetic monitoring system. *Natural Hazards*, *23*(2), 365-387. https://doi.org/10.1023/A:1011144602064

Al Heib, M., Hassoun, M., Emeriault, F., Villard, P., & Farhat, A. (2021). Predicting subsidence of cohesive and granular soil layers reinforced by geosynthetic. *Environmental Earth Sciences*, *80*, 1-24. https://doi.org/10.1007/s12665-020-09350-3

Alani, A. M., Tosti, F., Ciampoli, L. B., Gagliardi, V., & Benedetto, A. (2020). An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies. *NDT & E International*, *115*, 102288 . https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102288

Amelung, F., Galloway, D. L., Bell, J. W., Zebker, H. A., & Laczniak, R. J. (1999). Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*, *27*(6), 483-486 . https://doi.org/10.1130/0091-7613

Babaee, S., Khalili, M. A., Chirico, R., Sorrentino, A., & Di Martire, D. (2024). Spatiotemporal characterization of the subsidence and change detection in Tehran plain (Iran) using InSAR observations and Landsat 8 satellite imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *36*, 101290 . https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101290

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *40*(11), 2375-2383. https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792

Castellazzi, P., Arroyo-Domínguez, N., Martel, R., Calderhead, A. I., Normand, J. C., Gárfias, J., & Rivera, A. (2016). Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *47*, 10. https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.12.002

Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2003). Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geology*, *68*(1-2), 3-14. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00195-3

Colesanti, C., Mouelic, S. L., Bennani, M., Raucoules, D., Carnec ,C., & Ferretti, A. (2005). Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers technique—a case study in the east of France. *International Journal of Remote Sensing*, *26*(1), 201-207. https://doi.org/10.1080/0143116042000274069

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2002). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *39*(1), 8-20. https://doi.org/10.1109/IGARSS.1999.772008

Galloway, D. L., Jones, D. R., & Ingebritsen, S. E. (1999). *Land subsidence in the United States* (Vol. 1182). Geological Survey (USGS) .

Giao, P. H., Saowiang, K., & Anh, N. T. H. (2019). The Role of Groundwater and Land Subsidence Analysis for Sustainable Development of Infrastructure in Some SE Asian Cities. In *International Conference on Critical Thinking in Sustainable Rehabilitation and Risk Management of the Built Environment* (pp. 90-100). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61118-7_7

Haghighi, M. H., & Motagh, M. (2019). Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote Sensing of Environment*, *221*, 534-55. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.003

Hakało, J., & Wroński, J. (2003). Subsidence and its effects on the anterior plate stabilization in the course of cervical interbody spondylodesis. Part II. Clinical evaluation. Study design. *Neurologia i Neurochirurgia Polska*, *37*(5), 1063-1072 .https://europepmc.org/article/med/15174252

Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arıkan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, *514*, 1-13 . https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013

Hu, J. C., & Chiu, C. Y. (2023). Additional horizontal displacement across the transportation infrastructures induced by land subsidence revealed by SAR interferometry. *EGU General Assembly Conference Abstracts*. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2023EGUGA..25.5681H/doi:10.5194/egusphere-egu23-5681

Jones, C. E., Farr, T. G., Liu, Z., & Miller, M. M. (2020). Measuring Subsidence in California and Its Impact on Water Conveyance Infrastructure. In *Advances in Remote Sensing for Infrastructure Monitoring* (pp. 211-226). Springer . https://doi.org/10.1007/978-3-030-59109-0_9

Ma, P., Wu, Z., Zhang, Z., & Au, F. T. (2024). SAR-Transformer-based decomposition and geophysical interpretation of InSAR time-series deformations for the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge. *Remote Sensing of Environment*, *302*, 113962 . https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113962

Maghsoudi, Y., Amani, R., & Ahmadi, H. (2019). A Study of land Subsidence in West of Tehran Using Sentinel-1 Images and Permanent Scatterers Interferometry. *Iran-Water Resources Research*, *15*(1), 299-313 [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1398.15.1.22.9

Poland, J. F. (1984). *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal* . https://policycommons.net/artifacts/10710460/guidebook-to-studies-of-land-subsidence-due-to-ground-water-withdrawal/11617224/

Tolman, C. F., & Poland, J. F. (1940). Ground-water, salt-water infiltration, and ground-surface recession in Santa Clara Valley, Santa Clara County, California. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, *21*(1), 23-35. https://doi.org/10.1029/TR021i001p00023

Vol.14, No.4, Winter 2025, p. 21-42 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94085.1584 OPEN ACCESS

Morphotectonic Analysis of the Sefidrood Basin, Iran: An Integrated Methodological Framework Based on the Fibonacci Sequence and Gamma Distribution for Identifying Active Structural Patterns

Gholam Hassan Jafari[1]

[1]Department of Geography, Faculty of literature and Humanities, University of Yasouj, Yasouj, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 16 June 2025

Revised: 23 August 2025

Accepted: 24 August 2025

Available Online: 27 August 2025

Keywords:

Fibonacci Sequence

Neotectonics

Morphotectonics

Gamma Distribution

Dynamic Equilibrium

Sefidrood Basin

ABSTRACT

The Sefidrood Basin in northwestern Iran, located within the tectonically active Alborz–Central Iran transition zone, displays considerable structural complexity. This study employs mathematical and geometric patterns, particularly the Fibonacci sequence and the golden ratio, in combination with advanced statistical approaches such as the gamma distribution, the chi-square test, and Fisher's exact test, to investigate the morphotectonic and neotectonic conditions of the basin and its sub basins. Topographic and structural data were derived from maps and satellite imagery and analyzed using a GIS framework. A quantitative classification system based on Fibonacci ratios was applied to categorize the basin into five classes reflecting varying levels of morphotectonic activity. The results show that 96% of the basin lies within the range of weak to strong morphotectonic activity, whereas 4% is affected by neotectonic processes, primarily concentrated along the Qezelozan–Shahroud valleys, where neotectonic activity is most pronounced. Gamma based analysis confirms dynamic equilibrium with a skewness value of 0.7171 and a kurtosis of 0.782. The chi-square test indicates that the sub-basins behave independently with respect to morphotectonic activity, and Fisher's exact test demonstrates that all sub-basins operate within a shared ergodic structural framework. The findings indicate the presence of a negative cybernetic system with exponential memory that is adjusting the basin toward its base level in the Caspian Sea.

* Corresponding author: Gholam Hassan Jafari E-mail address: jafarihas@yu.ac.ir

How to cite this article: Jafari, G. H. (2025). Morphotectonic Analysis of the Sefidrood Basin, Iran: An Integrated Methodological Framework Based on the Fibonacci Sequence and Gamma Distribution for Identifying Active Structural Patterns. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 14*(4), 21-42. https://doi.org/10.22067/GEOEH.2025.94085.1584

©2025 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 Sefidrood Basin, a key sub-basin in northwestern Iran, features complex tectonic processes. Given its geographical and tectonic significance, identifying morphotectonic patterns and assessing its long-term equilibrium state are essential. This study adopt a Fibonacci-based geometric patterns and statistical analyses, including gamma distribution, chi-square tests, and Fisher's exact test, representing Iran's first integrated application of numerical approaches in morphotectonic analyses and distinguishing this work from prior studies.

Fibonacci sequences and the golden ratio ($\varphi = 1.618$) have been employed across disciplines, including architecture, geology, biology, and system modeling. In the Sefidrood Basin, these patterns serve as quantitative tools to identify potential zones of tectonic and neotectonic activity, differentiating this work from earlier qualitative assessments.

Material and Methods

A hybrid framework combines mathematical-statistical techniques with geomorphological analyses to evaluate the morphotectonic and neotectonic status of the Sefidrood Basin and its sub-basins. Key stages:

Data Collection: Topographic maps (DEM), field geological data, and 350 geospatial/elevation points were gathered and integrated in ArcGIS Pro to characterize tectonic features.

Fibonacci-based Classification: Morphotectonic data were categorized using Fibonacci ratios (0.236, 0.382, 0.5, 0.618, 0.764) to define five levels of tectonic activity, enhancing spatial pattern recognition.

Statistical Techniques: To address non-normality (right-skewed data), non-normal methods were employed: (1) Gamma distribution analysis for probabilistic modeling of long-term tectonic patterns; (2) Chi-square tests to assess independence between sub-basins and the main basin; (3) Fisher's exact test to compare variability where appropriate.

PDF/CDF Plots: Probability density functions and cumulative distribution functions were generated from the gamma distribution to visualize tectonic activity distributions.

GIS-Based Spatial Analysis: Overlay of fault lines, tectonic indices, Fibonacci patterns, gamma curves, and PDF/CDF maps in ArcGIS Pro provided insights into spatial relationships among tectonic features.

Comparative and Inductive Analyses: Two sub-basins were analyzed in detail (inductive approach), with remaining sub-basins summarized in tables (comparative approach) to identify commonalities and differences.

Moment Analysis and Inference: Statistical moments (mean, variance, skewness, and kurtosis) described the distribution of tectonic activity, enabling a robust characterization of the basin's statistical structure.

Results and Discussion

The Sefidrood Basin shows a highly organized large-scale structure despite tectonic complexity. About 96% of the basin area falls within the weak-to-intense morphotectonic activity range, with 4% neotectonically active, concentrated along the Qezelozan–Shahroud corridor (Manjil Fault). This pattern aligns with regional tectonic models of Arabia–Eurasia convergence, suggesting a phase of relative tectonic quiescence.

Interpretations include a negative-feedback, memory-dependent dynamics driving long-term stability, and a heterogeneous, nonlinear regime with localized deformation. These findings have implications for spatially targeted hazard management.

Gamma-distribution results (skewness 0.7171, kurtosis 0.782; mean 1.45, second moment 0.27, SD 0.519) indicate a stable system with no signs of imminent morphotectonic instability, consistent with non-normal probability approaches highlighted by Khosin & Wang (2022).

Chi-square and Fisher's exact tests show sub-basins are statistically independent from the main basin (chi-square values 6.2–53; all within 99% CI), suggesting a shared underlying tectonic driver within an ergodic framework.

GIS maps identify the highest activity along the Qezelozan–Shahroud corridor and Manjil Gorge; Rudshur lies outside the 95% CI, indicating independence from Zanjanrood.

Validation results show a confidence level of 90.85% with a two-tailed error margin below 8.9%, supporting the reliability of the methods. The study advances Fibonacci-based and gamma-distribution approaches for morphotectonic analysis and offers a framework for sub-basin dynamics within a unified tectonic system, with implications for water resource management, urban planning, and hazard mitigation.

Conclusion

An innovative approach combining Fibonacci patterns and gamma statistics reveals a dynamic equilibrium in the Sefidrood Basin, with only 4% neotectonic activity concentrated along major fault zones. Sub-basins are statistically independent yet integrated within a larger ergodic system, indicating shared long-term tectonic control. Fibonacci ratios and gamma distributions provide effective tools for hazard-zone identification and tectonic modeling, offering a framework for future research in similar basins and suggesting multi-scale, and spatial modeling methods for seismically active regions.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴ ، ص ۴۲-۲۱

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94085.1584 دسترسی آزاد

تحلیل مورفوتکتونیکی حوضهٔ سفیدرود، ایران: کاربرد تلفیقی دنباله فیبوناچی و توزیع گاما در شناسایی الگوهای ساختاری فعال

غلام حسن جعفری*[1]

[1] گروه جغرافیا، دانشکدهٔ ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۲

کلمات کلیدی:

دنباله فیبوناچی

نئوتکتونیک

مورفوتکتونیک

توزیع گاما

تعادل دینامیکی

حوضهٔ سفیدرود

چکیده

حوضهٔ سفیدرود در شمال‌غرب ایران به‌عنوان یکی از مناطق فعال تکتونیکی در زون البرز-ایران مرکزی، دارای پیچیدگی‌های زمین‌ساختی قابل‌توجهی است. این مطالعه با استفاده از الگوهای ریاضی - هندسی، به‌ویژه دنبالهٔ فیبوناچی و نسبت طلایی، به همراه روش‌های آماری پیشرفته شامل توزیع گاما، آزمون کای دو و تحلیل فیشر، به بررسی وضعیت مورفوتکتونیکی و نئوتکتونیکی این حوضه و زیرحوضه‌های آن پرداخته است. داده‌های توپوگرافی و ساختاری از نقشه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای استخراج و با استفاده از GIS تحلیل شدند. سپس، بر اساس یک چارچوب کمّی مبتنی بر نسبت‌های فیبوناچی، داده‌ها به پنج طبقه از نظر شدت فعالیت مورفوتکتونیکی طبقه‌بندی گردیدند. نتایج نشان داد که ۹۶ درصد از سطح حوضه در محدوده مورفوتکتونیک ضعیف تا شدید قرار دارد و تنها چهار درصد از حوضه، تحت فعالیت نئوتکتونیکی قرار دارد، که عمدتاً در امتداد درهٔ قزل‌اوزن-شاهرود با فعالیت نئوتکتونیکی شدید مشخص می‌شود. تحلیل‌های گاما، تعادل دینامیکی حوضه را با مقادیر چولگی (۰/۷۱۷۱) و کشیدگی (۰/۷۸۲) تأیید کردند. علاوه‌براین، تحلیل کای دو نشان داد که زیرحوضه‌ها از نظر فعالیت‌های مورفوتکتونیکی مستقل هستند، اما تحلیل فیشر برجسته کرد که تمام زیرحوضه‌ها در یک ساختار ارگودیک مشترک عمل می‌کنند. این یافته‌ها حاکی از وجود یک سیستم سایبرنتیکی منفی دارای حافظه نمایی است که حوضه را به سمت سطح اساس (دریای خزر) در حال تنظیم کردن است.

* نویسندهٔ مسئول: غلام‌حسن جعفری

E-mail: jafarihas@yu.ac.ir

مقدمه

حوضهٔ سفیدرود، به عنوان یکی از مهم‌ترین زیرحوضه‌های آبریز ایران، در گذرگاه پیچیده‌ای بین فلات ایران و رشته‌کوه‌های البرز-طالش قرار دارد و از لحاظ ژئودینامیکی تحت تأثیر فرآیندهای فشارشی ناشی از برخورد ورقه عربی و اوراسیا قرار دارد (Radfar, Berberian, 1995; Agard, Omrani, Jolivet & Mouthereau, 2005; Chakdel, Nejati, Soleimani & Taati, 2019). این برخورد، از کرتاسه پسین تا میوسن، منجر به شکل‌گیری یک سیستم کوهزایی گسترده شامل زاگرس، البرز، طالش و کپه‌داغ شده است (Berberian & King, 1981; Yin, 2010). در این چارچوب، حوضه‌های رسوبی درون‌کوهی مانند حوضهٔ سفیدرود، نه تنها به عنوان حافظه‌های رسوبی از تاریخچه تکاملی فلات ایران عمل می‌کنند (Mohajjel & Fergusson, 2014; Yin & Harrison, 2000)، بلکه به عنوان شاخص‌های حساس از فعالیت‌های مورفوتکتونیکی کواترنری مورد توجه قرار گرفته‌اند.

با این حال، پویایی مورفوتکتونیکی حوضهٔ سفیدرود، به‌ویژه در بخش‌های شمالی و مرکزی آن، با ناهنجاری‌های چشمگیری همراه است. تنگه‌های گلوگاهی مانند منجیل، طارم، هشتجین و ماهنشان که از لحاظ لیتولوژیکی مقاوم هستند؛ ارتباط مستقیم بین دریای خزر و زیرحوضه‌های قزل‌اوزن - شاهرود را مسدود کرده‌اند. این در حالی است که در بسیاری از نقاط، تعادل سطوح ارضی به گونه‌ای نامتعادل شده که با تغییرات اخیر سطح اساس قابل توجیه نیست. این پدیده نشان‌دهندهٔ تغییر حوضه از حالت آندورئیک (بسته) به آگزورئیک (باز) است؛ فرآیندی که احتمالاً تحت تأثیر فعالیت‌های نئوتکتونیکی جوان و رشد تاقدیس‌های فشارشی رخ داده است (Guest, Horton, Axen, Hassanzadeh & McIntosh, 2007).

با این وجود، تحلیل‌های مورفوتکتونیکی سنتی، مبتنی بر شاخص‌های کیفی یا نیمه‌کمّی مانند If، SL و Vf، در شناسایی الگوهای منظم و پیش‌بینی رفتار بلندمدت سیستم با محدودیت مواجه هستند. این روش‌ها اغلب نمی‌توانند نظم پنهان در توزیع گسل‌ها، چین‌ها و شبکهٔ زهکشی را آشکار کنند یا تعادل دینامیکی سیستم را به‌درستی ارزیابی نمایند. از این رو، نیاز به روش‌های کمّی، سیستماتیک و قابل تعمیم امری ضروری به نظر می‌رسد.

از این رو، نیاز به روش‌هایی کمّی و قابل تعمیم که بتوانند الگوهای پنهان در توپوگرافی و شبکهٔ زهکشی را شناسایی کنند، امری ضروری به نظر می‌رسد. در سال‌های اخیر، مطالعات نشان داده‌اند که الگوهای ریاضی مانند دنبالهٔ فیبوناچی و توزیع‌های آماری مانند گاما، می‌توانند در شناسایی نظم‌های فراگیر در ساختارهای زمین‌ساختی مؤثر باشند (Scholz, Dawers, Yu, Anders & Cowie, 1993). این روش‌ها قادر هستند با تحلیل فراکتالی و آماری داده‌ها، الگوهای تکرارشونده در فاصله گسل‌ها، موقعیت چین‌ها و شکل حوضه‌های زهکشی را آشکار کنند.

در این تحقیق، به منظور رفع محدودیت‌های روش‌های سنتی مورفوتکتونیکی، از تلفیق دنباله فیبوناچی و توزیع گاما به عنوان ابزاری کمّی و سیستماتیک برای تحلیل حوضهٔ سفیدرود استفاده شده است. هدف، شناسایی الگوهای منظم در توپوگرافی و شبکه زهکشی و ارتباط آن با فعالیت‌های تکتونیکی فعال است.

الگوهای ریاضی، به‌ویژه دنبالهٔ فیبوناچی و نسبت طلایی (φ≈۱/۶۱۸)، از دیرباز به عنوان پدیده‌هایی جهان‌شمول در علوم مختلف، از جمله زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هنر و زیست‌شناسی مورد توجه قرار گرفته‌اند (Kalman & Mena, 2003; Sharma, 2009). این الگوها با سادگی خود، قادرند ساختارهای بسیار پیچیده را در مقیاس‌های مختلف از کوچکترین ذرات تا کهکشان‌ها توصیف کنند. استفاده از این روابط ریاضی در زمین‌شناسی به ویژه در شناسایی الگوهای منظم در ساختارهای تکتونیکی، شبکه‌های گسلی، چین‌خوردگی‌ها و حتی فرآیندهای لرزه‌ای، یک حوزهٔ جذاب و در حال توسعه محسوب می‌شود (Khattab, Radwan, El-Anbaawy, Mansour & El-Tehiwy, 2023; Tiwari, Goswami & Bhakuni, 2021).

دیدگاه‌های هندسی نسبت به دنباله فیبوناچی از طریق در نظر گرفتن اعداد آن به عنوان بردارهایی در فضای سه‌بعدی، امکان شناسایی الگوهای هندسی در ساختارهای طبیعی را فراهم کرده است (Turner & Shannon, 1998; Turner, 1999). دنباله فیبوناچی

با تعریف ساده خود، جمله بعدی برابر با مجموع دو جمله قبلی (۰، ۱، ۱، ۲، ۳، ۵، ۸،...)، قابلیت توصیف ساختارهای بسیار پیچیده را دارد و اغلب در تشکیل الگوهای فراکتالی، خودشبیه‌سازی‌ها و ساختارهای طبیعی دیده می‌شود (Marples & Williams, 2022). در سال‌های اخیر، محققانی چون مهرنیا (Mehrnia, 2017) و استفانو و گومانیوک (Stepanov & Gomanyuk, 2023) نشان داده‌اند که الگوهای فیبوناچی می‌توانند در شناسایی روابط میان ساختارهای شکستگی و فعالیت‌های لرزه‌ای مؤثر باشند. در حوزه تکتونیک، نسبت‌های فیبوناچی به عنوان ابزاری برای مدل‌سازی و تحلیل داده‌های زمین‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرند و می‌توانند در درک بهتر ساختارهای زمین‌شناسی و تغییرات تکتونیکی موثر باشند. دوگلیونی (Doglioni, 1990) نیز نشان داد که اصول هندسی می‌توانند در تحلیل ویژگی‌های تکتونیکی مرتبط باشند، هرچند کاربردهای مشخص در تکتونیک همچنان کم‌شمار هستند.

در دهه‌های اخیر، استفاده از نسبت‌های فیبوناچی در تحلیل‌های زمین‌ساختی به‌ویژه در مناطق فعال تکتونیکی، افزایش یافته است. این رویکرد در مناطقی مانند آندیس، مدیترانه و ژاپن با موفقیت به کار رفته است (Scholz & Aviles, 1986; Scholz et al., 1993). در ایران، الگوهای ریاضی، به‌ویژه دنباله فیبوناچی و نسبت طلایی، در سال‌های اخیر کاربرد فزاینده‌ای در علوم مختلف، از جمله معماری، برنامه‌ریزی شهری، زمین‌شناسی و مدیریت خطرات طبیعی یافته‌اند. در معماری اسلامی-ایرانی نیز استفاده از این تناسبات به صورت گسترده در آثار متعدد تاریخی مشاهده شده است. مثلاً در مطالعه اصول هندسی و تناسبات طلایی موجود در مدرسه شوکتیه، هاشمی زرج آباد و همکاران (Hashemi Zarjabad, Ziaieniya & Ghorbani, 2015) نشان دادند که معماران قدیمی ایرانی از دانش عمیقی در زمینه نظام‌های تناسباتی و ترسیمات هندسی برخوردار بوده‌اند و این دانش را در طراحی فضاهای معماری به‌خوبی به کار گرفته‌اند. همچنین ضیایی‌نیا و هاشمی زرج‌آباد (Ziaieniya & Hashemi Zarjabad, 2016) در مطالعه خود به بررسی تناسبات معماری مسجد جامع قائن پرداخت و نشان دادند که سیستم تناسبات ایرانی-اسلامی بر پایه اعداد اصم و مربع مضاعف استوار است و در کنار آن، از نسبت طلایی نیز برای ایجاد تعادل بصری در عناصر مهم معماری (مانند ایوان و ورودی اصلی) استفاده شده است. این موضوع برجسته می‌کند که الگوهای عددی و هندسی در فرهنگ معماری ایرانی به صورت غیرتصادفی وجود دارند و می‌توانند الهام‌بخش روش‌های نوین تحلیلی در سایر حوزه‌های علمی باشند.

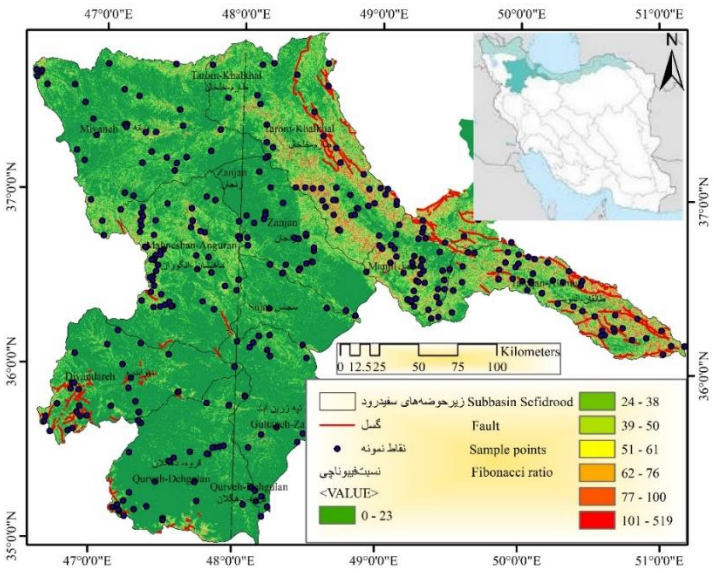
مهرنیا (Mehrnia, 2017) در تحقیقی تحت عنوان «شناسایی الگوی مکانی زلزله‌های غرب ایران به روش فیبوناچی»، این الگوها را در تحلیل مکانی زلزله‌های غرب ایران به کار گرفت. او نشان داد که توزیع پس‌لرزه‌های زلزله ۷/۳ ریشتری ازگله (۲۰۱۷ میلادی) در قالب مثلث طلایی (زاویه رأس ۳۶ درجه)، دایره طلایی (کمان ۱۳۷/۵ درجه) و مارپیچ طلایی قرار گرفته است. این مطالعه، وجود نظم فضایی غیرتصادفی در توزیع زلزله‌ها را تأیید کرد و نشان داد که روش‌های ریاضی می‌توانند در شناسایی نقاط بالقوه خطر زلزله مؤثر باشند. تحلیل‌هایی که در مقاله بازیابی ساختار فضایی و طرح کاشت باغ سالار جنگ شیراز (Asadpour, 2018) انجام شد، نشان داد که ساختارهای فضایی باغ‌های فارسی با الگوهای هندسی و ریاضی اسلامی همخوانی بالایی دارند. این رویکرد هندسی، اصولاً در طراحی فضایی و مرتب‌سازی عناصر طبیعی نیز کاربرد دارد. آن‌ها نشان دادند که هندسه و تناسبات طبیعی در خانه‌های سنتی ایرانی نقش کلیدی در ایجاد فضای داخلی مطلوبی به‌ویژه در مناطق گرم و خشک ایران دارند. بلیان و حسن‌پور لمر (Bililan & Hassanpour Lamr, 2019) ، در مطالعه خود به بررسی الگوهای هندسی و تناسبات طلایی در روستای تاریخی ابیانه پرداختند. آن‌ها نشان دادند که مستطیل طلایی، مثلث خیام-پاسکال، مارپیچ طلایی، پنج‌ضلعی طلایی و سلسله اعداد فیبوناچی، نقش کلیدی در طراحی معماری و صنایع دستی این روستا داشته‌اند. این مطالعه مؤید آن است که هنرمندان ایرانی اسلامی از تناسبات طلایی به عنوان زبانی مشترک در تمامی طرح‌های هنری و معماری استفاده کرده‌اند و این موضوع می‌تواند الهام‌بخش استفاده از الگوهای عددی در علوم طبیعی و زمین‌ساختی نیز باشد.

معمارزاده و همکاران (Memarzadeh, Hosseinzadeh Lotfi, Jahanshahlu & Dehqan Toranposhti, 2022) در مطالعه خود با عنوان «رتبه‌بندی ایستگاه‌های آتش‌نشانی با استفاده از تکنیک دنباله فیبوناچی»، این الگوها را در بهینه‌سازی مکان‌یابی ایستگاه‌های خدماتی در منطقه ده تهران به کار گرفتند. آن‌ها با مقایسه این روش با روش‌های متداول تصمیم‌گیری چندمعیاره، نشان دادند که روش فیبوناچی تطابق بالایی با معیارهای عملکردی و فضایی دارد و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کمّی در تحلیل‌های فضایی و مکان‌یابی بهینه خدمات شهری استفاده شود.

با توجه به منابع فوق، واضح است که الگوهای فیبوناچی و نسبت طلایی در ایران بیشتر در حوزه‌های هنری و طراحی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، استفاده از این الگوها در علوم زمین، ژئومورفولوژی و زمین‌ساخت هنوز در مراحل ابتدایی است و تعداد محدودی از مطالعات به‌صورت توصیفی به آن پرداخته‌اند. این مقاله با تمرکز بر حوضه سفیدرود، یکی از مناطق فعال تکتونیکی ایران، به بررسی وجود الگوهای فیبوناچی در ساختارهای زمین‌ساختی و نقش آنها در تبیین رفتارهای زمین‌ساختی می‌پردازد.

منطقهٔ مورد مطالعه

حوضهٔ آبریز سفیدرود یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین حوزه‌های آبگیری در منطقه شمال غرب و غرب ایران است که در استان‌های گیلان، البرز، قزوین، آذربایجان شرقی، اردبیل، زنجان، کردستان، بخش‌های کوچکی از آذربایجان غربی، مازندران و همدان گسترده شده است. این حوضه به‌طور تقریبی در عرض جغرافیایی ۳۵° تا ۳۸° شمالی و طول جغرافیایی ۴۶/۸° تا ۵۱° شرقی قرار دارد. این حوزه جغرافیایی شامل مسیر جریان اصلی رودخانه سفیدرود است که از کوه‌های چهل‌چشمه در رشته‌کوه‌های زاگرس در استان کردستان سرچشمه می‌گیرد و پس از طی مسیری طولانی، در نهایت به دریای خزر می‌ریزد. مساحت کل حوضه بالغ بر ۵۹۰۰۰ کیلومتر مربع است، که شامل حوضه‌های قزل‌اوزن و شاهرود می‌باشد و نقش مهمی در تنظیم آب و اقلیم منطقه دارد. طول مسیر اصلی رودخانه سفیدرود، تقریبا ۶۰۰ کیلومتر، ارتفاع سرچشمه‌ها، بیش از ۳۰۰۰ متر از سطح دریا، ارتفاع دهانه خروجی به دریای خزر، تقریبا ۲۸- متر و میانگین شیب مسیر جریان، حدود ۵ تا ۸ درصد است که نشان‌دهنده شیب ملایم و مسیر طولانی است. این مقاله برای اولین بار چارچوب کمّی برای ارتباط نسبت طلایی با پارامترهای تکتونیکی در حوضه سفیدرود را توسعه داده است و یک مدل ترکیبی ریاضی-زمین‌شناسی با قابلیت پیش‌بینی الگوهای ساختاری و گسلش در این حوضه سفیدرود ارائه داده است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت حوضهٔ سفیدرود به همراه زیرحوضه‌های آن و نقاط نمونه

Fig. 1. Location of the Sefidrood basin, along with its subbasins and sample points

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، به منظور شناسایی و تحلیل الگوهای فیبوناچی در ساختارهای مورفوتکتونیکی حوضه سفیدرود، یک رویکرد کمّی و هندسی-آماری توسعه داده شده است. این روش با تلفیق داده‌های ژئومورفولوژیکی، ساختارهای عددی فیبوناچی و تحلیل‌های آماری پیشرفته، قابلیت شناسایی و طبقه‌بندی سطوح مختلف فعالیت تکتونیکی و نئوتکتونیکی را در مقیاس حوضه و زیرحوضه‌ها فراهم می‌کند. روش کار شامل چندین مرحله اصلی است:

جمع‌آوری و استخراج داده‌های مکانی و ژئومورفولوژیکی

در مرحله اول، داده‌ها از نقشه‌های توپوگرافی و داده‌های DEM (مدل رقومی زمین) با دقت ۳۰متر، از حوضهٔ سفیدرود جمع‌آوری شدند. برای ارزیابی وضعیت تکتونیکی حوضه سفیدرود و زیرحوضه‌های آن، یک مجموعه داده میدانی شامل ۳۵۰ نقطه نمونه‌برداری ساختاری جمع‌آوری شد. این نقاط، نماینده ساختارهای کلیدی زمین‌ساختی حوضه از جمله گسل‌های فشارشی، چین‌های جوان، خطوط شکستگی، تغییرات شیب توپوگرافی و ناهمگونی‌های زهکشی بوده و از طریق بازدیدهای میدانی سیستماتیک و با استفاده از دستگاه GPS دقت‌بالا (دقت مکانی ≤ ۳ متر) ثبت شدند (شکل ۲). هر نقطه با توجه به معیارهای مشخصی از جمله دسترسی فیزیکی، بیانگر بودن فعالیت تکتونیکی و تنوع جغرافیایی در سراسر حوضه انتخاب گردید. در هر نقطه، مختصات جغرافیایی (طول و عرض جغرافیایی) و ارتفاع ثبت شد. این داده‌ها در یک ساختار پیوسته آماری (Spatial Database) در محیط GIS یکپارچه شدند و به عنوان پایه‌ای برای تحلیل‌های مورفوتکتونیکی و ریاضی-آماری مورد استفاده قرار گرفتند تا معین گردد: آیا کلیت حوضه در مرحلهٔ آرامش تکتونیکی قراردارد یا خیر؟ و آیا بخش‌های از زیرحوضه‌های حوضهٔ سفیدرود، درکیاس نئوتکتونیکی در مقایسه با زیرحوضه‌ها قرار دارد؟

گروه‌بندی داده‌ها بر اساس الگوی فیبوناچی

داده‌های تلفیقی حاصل از شاخص‌های شیب و مرکزی، پس از نرمال‌سازی در بازه (۰/۱)، بر اساس یک چارچوب کمّی الهام‌گرفته از نسبت‌های فیبوناچی طبقه‌بندی شدند. این نسبت‌ها، از جمله ۰/۲۳۶، ۰/۳۸۲، ۰/۵، ۰/۶۱۸ (نسبت طلایی) و ۰/۷۶۴ و بالاتر، در علوم مختلفی مانند فیزیک، زیست‌شناسی و دینامیک سیستم‌های پیچیده به‌عنوان نقاط آستانهٔ طبیعی در تقسیم‌بندی الگوهای نظم و تحول مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Kalman & Mena, 2003; Sharma, 2009). در این تحقیق، این نسبت‌ها به‌عنوان مرزهای منطقی برای تمایز سطوح فعالیت تکتونیکی به کار گرفته شدند؛ مقادیر زیر ۰/۲۳۶ بیانگر فعالیت بسیار ضعیف، ۰/۲۳۶-۰/۳۸۲ نشان‌دهندهٔ سطح نسبتاً متوسط، ۰/۳۸۲-۰/۵ متوسط، ۰/۵-۰/۶۱۸ شدید (نزدیک به آستانه بحرانی)، ۰/۶۱۸-۰/۷۶۴ بیانگر گذار مورفوتکتونیک به تکتونیک فعال (بحرانی)، و مقادیر بالاتر از ۰/۷۶۴ نشان‌دهندهٔ شرایط بسیار بحرانی و غالب بودن فرآیندهای نئوتکتونیکی در نظر گرفته شده‌اند. این روش، با بهره‌گیری از الگوهای ریاضی موجود در سیستم‌های پویای طبیعی، چارچوبی سیستماتیک و قابل تکرار برای تفسیر کیفی داده‌های پیچیده مورفوتکتونیکی ارائه می‌دهد.



شکل ۲- عکس‌هایی از محل برداشت مختصات قله و کنیک ناهمواری توسط GPS در بازدیدهای میدانی

Fig.2. photographs showing the acquisition of summit and conic-relief GPS coordinates during ground surveys

آزمون تقارن و توزیع داده‌ها

در مرحلهٔ بعد، داده‌های گروه‌بندی شده به‌منظور بررسی تقارن و نرمال بودن با استفاده از آزمون‌های آماری مانند کومولوگراف، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در صورت عدم وجود تقارن، داده‌ها با استفاده از تبدیل‌های لگاریتمی و Box-Cox نرمال‌سازی شدند. این مرحله به کاهش خطای منطقی در تحلیل‌های آماری بعدی کمک می‌کند.

مدل‌سازی توزیع گاما

با توجه به اینکه متغیرهای مورفوتکتونیکی (مانند شدت فعالیت گسلی و شیب‌ها (از نوع پیوسته هستند، تابع توزیع گاما به عنوان یک توزیع احتمالی غیرنرمال و مناسب برای داده‌های مثبت و نامتقارن، انتخاب شد. فرمول تابع چگالی احتمال(PDF) توزیع گاما به صورت رابطه (۱) است:

$$\boldsymbol{f(x) = \frac{\lambda^{\beta}}{\Gamma(\beta)}\left(X^{(\beta-1}e^{-\lambda X)}\right)} \qquad (۱)$$

λ ضریب مقیاس، β ضریب شکل، $\Gamma(\beta)$ تابع گامای استاندارد است؛ البته β عملگر گاما نیز می باشد. برای محاسبه ضرایب λ و β از روابط (۲) و (۳) استفاده شد:

$$\boldsymbol{\lambda = E(X)/(\mu_2)} \qquad (۲)$$

$$\beta = \frac{E(X)^2}{\mu_2} \qquad (۳)$$

$E(X)$ امید ریاضی و μ_2 گشتاور دوم حول میانگین است (Makar & Rubin, 2017).

محاسبهٔ گشتاورهای آماری و شاخص‌های توزیع

در ادامه، گشتاورهای آماری مربوط به توزیع گاما محاسبه شدند (گشتاور دوم حول میانگین (رابطه ۴)، واریانس) جهت محاسبهٔ امیدریاضی گامای حوضه، که در محاسبهٔ انحراف استاندارد گامای حوضه از آن استفاده خواهد شد (رابطه ۵). با توجه به مقدار انحراف استاندارد فیبوناچی مورفوتکتونیک حوضه وضعیت تکتونیکی آن برآورد و بررسی خواهد شد. این نسبت، به این دلیل حائز اهمیت است که یکی از پایه‌های محاسبهٔ ضریب‌های چولگی (رابطه ۶) و کشیدگی (رابطه ۷) شاخص مورفوتکتونیک حوضه می‌باشد. مقدار کلاسیک کشیدگی گامائی در منابع (β /۶) محاسبه شده است (Makar & Rubin, 2017). این شاخص‌ها به تحلیل تعادل دینامیکی ساختارهای مورفوتکتونیکی و شناسایی مناطق با خطر نئوتکتونیکی کمک کردند.

$$\mu_2 = E(X^2) - [E(X)]^2 \quad (۴)$$

$$\sigma = \sqrt{\mu_2} \quad (۵)$$

$$S = \frac{E[(X-\mu)^3]}{\sigma^3} \quad (۶)$$

$$K = \frac{E[(X-\mu)^4]}{\sigma^4} \quad (۷)$$

تحلیل مقایسه‌ای زیرحوضه‌ها با کل حوضه

بعد از اینکه وضعیت تعادل دینامیکی در توزیع گاما روی مورفوتکتونیک حوضه انجام شد می‌توان از یکی از ساختارهای قابل قبول برای تعیین میزان وابستگی هر یک از زیر حوضه‌ها با کل حوضه استفاده کرد. ساختار قابل قبول برای زیرحوضه‌ها، مقایسهٔ جبر احتمالاتی گشتاوردوم حول میانگین می‌باشد. بدیهی است که گشتاوردوم حول میانگین عملکردی موازی با واریانس نمونه‌ای البته در داده‌های گسسته دارد. از آنجایی که کمیت مورد نظر، شدت فعالیت مورفوتکتونیک تا تکتونیک و نئوتکتونیک داده‌ای پیوسته است لزوماً باید از ساختار محاسبه فوق استفاده نمود. یکی از کاربردهای این تابع احتمال در مبحث استنباط آماری از میزان تعامل عملکردی هر زیر حوضه با حوضهٔ اصلی است. با توجه به اینکه مجموعه برداشت‌های هر کدام از زیرحوضه‌ها یک نمونهٔ تصادفی از برداشت‌های کل حوضه می‌باشند. با توجه به مراحل فوق از کمیت فعالیت مورفوتکتونیکی زیرحوضه‌ها جهت استباط آماری تحلیل کای دو از هر زیرحوضه نسبت به حوضهٔ مادر مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

اعتبارسنجی نتایج با استفاده از CDF و PDF توزیع گاما

در نهایت، نتایج با استفاده از توابع تجمعی احتمال (CDF) و PDF توزیع گاما اعتبارسنجی شدند. این مرحله به ویژه در محدودهٔ حداقل و حداکثر فعالیت مورفوتکتونیکی انجام شد. به دلیل نمایی بودن توزیع گاما، از روش انتگرال‌گیری جزء به جزء ریمانی استفاده شد.

استقلال یا وابستگی زیرحوضه‌ها با تحلیل فیشر

در توزیع فیشر، علاوه بر روابط فوق، برای محاسبه مقدار کلی PDF از رابطه (۸) نیز استفاده شده است.

$$f_F^{(X)} = PDF = \left(\frac{\Gamma\left(\frac{(k+l)}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{k}{2}\right) * \Gamma\left(\frac{l}{2}\right)} \right) * \int_0^{\infty} \frac{x^{(\frac{k}{2}-1)}}{(1+\left(\frac{k}{l}\right)x)^{\frac{(k+l)}{2}}} \quad (۸)$$

که در آن k و l درجه آزادی زیرحوضه‌های مقایسه‌شده که از تعداد برداشت‌های مورفوتکتونیکی هر زیرحوضه فراهم آمده و Γ تابع گاما است. در ساختار فیشر فوق $\left(\frac{\Gamma\left(\frac{(k+l)}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{k}{2}\right)*\Gamma\left(\frac{l}{2}\right)}\right)$ کیمت کولموگروف می‌باشد که سبب چگال شدن PDF می‌گردد. در تحلیل، محاسبه و برآورد تابع PDF فیشر با توجه به ساختار تابع احتمال آن، اگر از محاسبهٔ جزء به جزء ریمانی در ساختار انتگرال معین

استفاده گردد به راحتی هم مقدار چگال کولموگروف تابع PDF و هم ساختار CDF تابع قابل محاسبه می‌باشد (Makar & Rubin, 2017). این رابطه به‌عنوان اساس تحلیل‌های فیشر در این تحقیق استفاده شد.

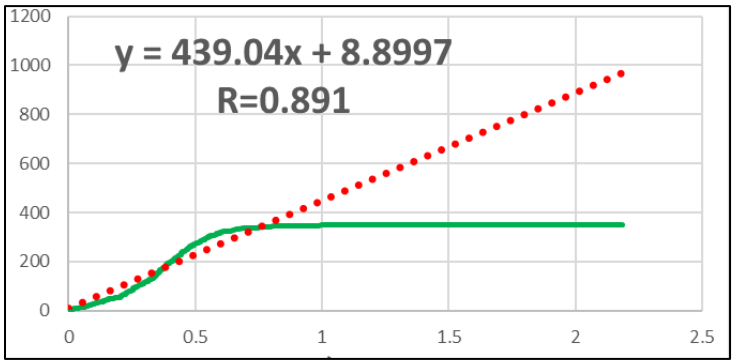
تحلیل گرافیکی و تفسیر فضایی

در پایان، داده‌های مورفوتکتونیکی به صورت گرافیکی ترسیم شدند. شدت فعالیت تکتونیکی در محور X و درصد گروه‌بندی شده بر اساس نسبت طلایی فیبوناچی در محور Y قرار گرفت. این نمودار به تحلیل فضایی و تعیین نقاط بحرانی در حوضه کمک کرد.

نتایج و بحث

در این پژوهش، با استفاده از تلفیق الگوهای ریاضی - هندسی (فیبوناچی و نسبت طلایی) و روش‌های آماری پیشرفته (توزیع گاما، آزمون کای دو، تحلیل فیشر)، به بررسی وضعیت مورفوتکتونیکی و نئوتکتونیکی حوضهٔ سفیدرود پرداخته شد. این رویکرد نوین، علاوه بر ارائهٔ چارچوب نظری برای درک تحولات زمین‌ساختی، ابزارهای تحلیلی نوآورانه‌ای را برای برنامه‌ریزان محیطی و مدیران منطقه‌ای فراهم کرده است. در این بخش، یافته‌های تحقیق با تأکید بر تحلیل‌های ریاضی - آماری و تطبیق با مطالعات قبلی مورد بحث قرار می‌گیرند.

با توجه به گرادیان به‌دست‌آمده از تحلیل فیبوناچی بر روی داده‌های ژئومورفولوژیک حوضهٔ سفیدرود، مشخص شد که داده‌ها در ساختار پیوستهٔ آماری قرار دارند. داده‌های مورفوتکتونیکی حوضه، در قالب نسبت‌های فیبوناچی گروه‌بندی و تحت آزمون گوس قرار گرفتند. با توجه به عدم تقارن داده‌ها در سمت راست محورZ ، استفاده از توزیع نرمال منجر به خطای منطقی می‌شود. بنابراین، در تحلیل‌های قیاسی و استقرایی این مطالعه از روش‌های گامایی استفاده شد. برای دستیابی به دید جامع‌تر، تنها دو مورد از داده‌ها به‌صورت کاملاً استقرایی تفسیر شدند. همچنین، ضریب رگرسیون خطی ۰/۸۹ از تحلیل پیرسون بین داده‌های فیبوناچی و مورفوتکتونیک حوضه، محاسبه شد (شکل ۳).



شکل ۳– نتایج تحلیل‌های گامایی و پیرسون خطی کمیت مورفوتکتونیک نسبت به نقاط اندازه‌گیری شده

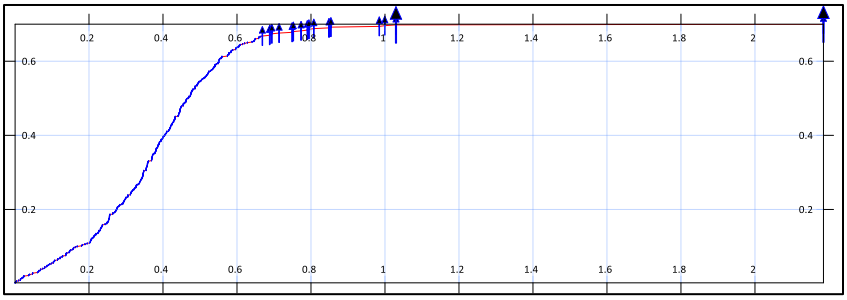
Fig. 3. Results of gamma and linear Pearson analyses of the morphotectonic index relative to measured points

تحلیل نمودارهای گامایی حوضه، نشان می‌دهد که بیشترین درصد سطح حوضه (۹۶٪) در محدودهٔ مورفوتکتونیک ضعیف تا شدید قرار دارد، در حالی که تنها چهار درصد از حوضه، تحت تأثیر فعالیت‌های نئوتکتونیکی است (شکل ۴). عمدهٔ این مناطق در امتداد دره قزل اوزن - شاهرود و در اطراف تنگ منجیل قرار دارند که با مسیر گسل‌های منطقه همخوانی دارد. این یافته نشان می‌دهد که فعالیت‌های نئوتکتونیکی در حوضهٔ سفیدرود متمرکز به قسمت‌های شمالی آن است. این الگو نشان‌دهندهٔ تعادل نسبی حوضه و عدم وجود ناپایداری‌های گسترده تکتونیکی است. این یافته‌ها با نتایج رادفر و همکاران (Radfar et al., 2019) دربارهٔ فشار

ناشی از برخورد صفحه عربی با صفحه اوراسیا همخوانی دارد. این موضوع می‌تواند به دو دلیل اصلی تفسیر شود: ۱- حوضهٔ سفیدرود تحت تسلط یک سیستم سایبرنتیکی منفی دارای حافظه نمایی[۱] قرار دارد که به سمت تعادل دینامیکی حرکت می‌کند. ۲- حوضه در مرحله آرامش نسبی قرار دارد و فعالیت‌های تکتونیکی در آن به‌صورت پراکنده و غیریکنواخت است. این یافته‌ها می‌توانند به برنامه‌ریزان محیطی و مدیران منطقه‌ای کمک کنند تا برنامه‌های مدیریت بحران را به‌صورت منطقه‌ای و نه سراسری طراحی کنند.

استفاده از نسبت‌های فیبوناچی (۰/۲۳۶، ۰/۳۸۲، ۰/۵، ۰/۶۱۸ و ۰/۷۶۴) در این تحقیق، امکان مرکزگیری از فعالیت‌های تکتونیکی و نئوتکتونیکی را فراهم کرد. این مرکزگیری به شناسایی مناطق با فعالیت ضعیف، متوسط، شدید و نئوتکتونیکی کمک کرد. این یافته‌ها با تحقیقات مارپلز و ویلیامز (Marples & Williams, 2022) و فیض‌اله بیگی و همکاران (Feizolahbeigi, Lourenço, Golabchi, Ortega & Rezazadeh, 2021) دربارهٔ کاربرد نسبت طلایی در معماری طبیعی و ساختارهای مقاوم در برابر زلزله، تطبیق دارد. با توجه به همگنی مورفوتکتونیکی حوضه، می‌توان فرض کرد که آغاز فعالیت‌های نئوتکتونیکی در آینده، از همان موقعیت‌های کیاسیک رخ خواهد داد. مقایسه هر زیرحوضه با کل حوضه، امکان دستیابی به یک دید مورفوفولوزیکی دقیق‌تر را فراهم می‌کند که می‌تواند در مدیریت ریسک و برنامه‌ریزی بحران‌های آتی بسیار مؤثر باشد.

در نمودارهای شکل ۲ و ۳، چولگی به سمت راست ساختار مورفوتکتونیکی به‌خوبی مشهود است. این ویژگی، ضرورت استفاده از روش‌های غیرنرمال را در تحلیل داده‌ها برجسته می‌کند. لذا، بهترین راهکار برای محاسبهٔ کمیت‌های هندسی و فعالیت مورفوتکتونیکی هر زیرحوضه نسبت به ساختار ارگودیک حوضه، استفاده از روش‌های گامایی است. این امر با نتایج دوگلیونی (Doglioni, 1990) دربارهٔ اهمیت استفاده از توابع احتمال غیرنرمال در تحلیل‌های زمین‌ساختی همراهی دارد.



شکل ۴- تجسم عینی میزان فعالیت تکتونیکی حوضهٔ سفیدرود با اغراق در محور X

Fig. 4. Visualization of tectonic activity of the Sefidrood basin with exaggeration on the X axis

ضریب همبستگی تابع رگرسیون خطی پیرسون حوضه ۰/۸۹ است که قابلیت اطمینان بالایی دارد. با استفاده از این رابطه و در بازهٔ حداقل تا حداکثر فعالیت تکتونیکی، تابع پیرسون به روش کولموگروف بر روی حوضه مستولی شد تا از آن به جای میانگین، از امید ریاضی (EX) برای محاسبه کمّی تغییرات مورفوتکتونیکی کل حوضه به صورت ژئومتریک استفاده شود.

$$f(X) = (0.00094) * \int_{0.000306}^{19/5155} (X)(439.04X + 8.8997)dx = 1.45$$

$$\mu_2 = (0.00094) * \int_{0.000306}^{19/5155} (X - 1.45)^2 * (439.04X + 8.8997)dx = 0.27$$

۱ - سیستم سایبرنتیکی منفی دارای حافظه نمایی: سیستمی کنترلی که با استفاده از فیدبک منفی، پایداری را حفظ می‌کند و رفتار آن به وضعیت‌های قبلی وابسته است، به‌گونه‌ای که تأثیر گذشته با یک تابع نمایی $(e^{-\lambda t})$ کاهش می‌یابد.

امید ریاضی کمیت فعالیت مورفوتکتونیکی حوضه‌ی سفیدرود (۱/۴۵) و گشتاوردوم حول میانگین (۰/۲۷) اساس محاسبه پارامترهای توزیع گاما را تشکیل داد:

$$\beta = \frac{2.1}{0.27} = 7.8 \qquad \lambda = \left(\frac{1.45}{0.27}\right) = 5.37$$

بنابراین گامای ارگودیک ژئوموفولوژیکی حوضه برابر ۷/۸ می‌باشد. درمحاسبه‌ی Pdf گامای حوضه داریم که:

$$f(X) = (0.00030936) * \int_0^{10} ((476145.84) * \left(X^{(6.778)}\right) * (\exp(-5.37 * \mathrm{X}))\mathrm{dx}$$

$$\mathrm{E}(X) = (0.00030936) * \int_0^{10} (X) * ((476145.84) * \left(X^{(6.778)}\right) * (\exp(-5.37 * \mathrm{X}))\mathrm{dx} = 1.448$$

مقدار ۱/۴۴۸ دقیقاً با امید ریاضی تابع پیرسون خطی حوضه همخوانی دارد و این هماهنگی، اعتبار بسیار بالای تحلیل‌های گامایی را تأیید می‌کند. همچنین، این همخوانی نشان می‌دهد که استفاده از میانگین سادهٔ گسسته، منجر به نتایج نادرست و غیرقابل اعتمادی در تفسیر ساختارهای تکتونیکی خواهد شد.

در مرحله بعد، برای محاسبه انحراف معیار و ارزیابی پراکندگی فعالیت‌های مورفوتکتونیکی، از رابطه زیر استفاده شد:

$$SMM = (0.00030936) * \int_0^{10} (X - 1.448)\text{^}2 * ((476145.84) * \left(X^{(6.778)}\right) * (\exp(-5.37 * \mathrm{X}))\mathrm{dx} = 0.2697$$

$$STDEV.P = \sqrt{0.2697} = 0.519$$

انحراف معیار ۰/۵۱۹ نشان‌دهنده توزیع فعالیت‌های تکتونیکی در محدودهٔ متوسط تا شدید است. همچنین، این مقدار یکی از پایه‌های اصلی در محاسبه چولگی و کشیدگی ساختارهای مورفوتکتونیکی حوضه است (روابط ۶ و ۷).

هرچه چولگی برداشت‌های مورفوتکتونیک حاصل از تحلیل فیبوناچی در حوضهٔ سفیدرود به صفر نزدیک‌تر باشد حوضه از نظر تکتونیکی درحالت تعادل بیشتری می‌باشد. در تحلیل‌های آماری این تحقیق، مقدار چولگی از طریق گشتاور مرکزی مرتبه سوم محاسبه شد:

$$TMM = (0.00030936) * \int_0^{10} (X - 1.448)\text{^}3 * ((476145.84) * \left(X^{(6.778)}\right) * (\exp(-5.37 * \mathrm{X}))\mathrm{dx} = 0.1004558$$

$$SK = \frac{0.1004558}{0.519^3} = 0.7171$$

این مقدار دقیقاً با مقدار چولگی محاسبه‌شده از رابطه استاندارد گاما ($\frac{2}{\sqrt{7.7778}} = 0.7171$) همخوانی دارد، که مؤید دقت بالای محاسبات انجام‌شده است. مقدار چولگی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که توزیع فعالیت‌های مورفوتکتونیکی حوضه دارای تمایل خفیف به سمت راست است، اما این عدم تقارن در محدوده قابل قبولی قرار دارد. بنابراین، حوضه سفیدرود از نظر تکتونیکی در وضعیت تعادل نسبی قرار دارد و هیچ گرایشی به ناپایداری شدید در آن مشاهده نمی‌شود. این یافته به معنای این است که شاکله مورفیک حوضه به سمت عدم تعادل پیش نمی‌رود بلکه از ساختار نمائی حافظه‌دار $Y = \lambda e^{-\lambda X}$ تبعیت می‌نماید که توضیح آن در این پژوهش نمی‌گنجد. این وضعیت تعادلی در حوضهٔ سفیدرود با نتایج مطالعات قبلی در مناطق مشابه، مانند تحقیقات والدرون و اسنیدر (Waldron & Snyder, 2020) و ناصف (Nassef, 2015) درباره الگوهای هندسی طبیعی سازگار است.

برای تخمین کشیدگی ساختار مورفوتکتونیکی حوضه، از گشتاور چهارم حول میانگین استفاده شد:

$$FMM = (0.00030936) * \int_0^{10} (X - 1.448)\text{^}4 * ((476145.84) * \left(X^{(6.778)}\right) * (\exp(-5.37 * \mathrm{X}))\mathrm{dx} = 0.274373$$

در حقیقت مقدار۰/۲۷۴ گشتاور چهارم حول میانگین می‌باشد و جهت محاسبهٔ کشیدگی حوضه این مقدار باید بر توان چهارم انحراف استاندارد حوضه که در بخش قبلی محاسبه شد تقسیم گردد. در نهایت در برآورد کشیدگی حوضهٔ سفیدرود داریم که:

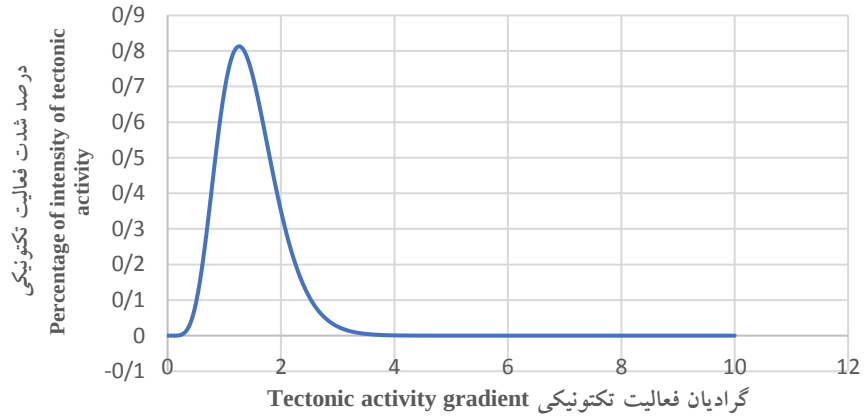
$$Kurtosis = \frac{FMM^4}{\sigma^4} = \frac{0.274373}{0.072555} = (3.782 - 3) = 0.782$$

بنابر کمیت محاسبه شدهٔ مذکور کشیدگی حوضهٔ سفیدرود مزوکورتیک (۰/۷۸۲) می‌باشد یعنی حول کمیت صفر، و این نیز خود بیانگر عدم وجود ناتعادلی در شاکلهٔ مورفولوژیک حوضهٔ سفیدرود می‌باشد. مقدار کلاسیک کشیدگی گامائی در منابع (β/۶) محاسبه شده است که به طور اعجاب‌انگیزی در برآورد این مقدار برای حوضه‌ی ژئومورفیک سفیدرود داریم که:

$$\text{Kurtosis} = \frac{6}{\beta} = \frac{6}{7.7778} = 0.782$$

این مقدار با مقدار استاندارد گاما برابر است و برجسته می‌کند که توزیع فعالیت‌های مورفوتکتونیکی دارای کشیدگی مزوکورتیک است. مقدار کشیدگی مزوکورتیک بیانگر تعادل نسبی و عدم وجود نوسانات شدید در ساختار حوضه است. در مقایسه با منحنی نرمال، این مقدار با الگوی کلاسیک تطبیق دارد و نشان‌دهنده فقدان نقاط بحرانی با فعالیت‌های غیرعادی است. همچنین، مقدار به‌دست‌آمده از چولگی و کشیدگی با همبستگی خطی بالا (R=۰/۸۹) تأیید می‌کند که حوضه تحت یک ساختار ارگودیک و سایبرنتیکی بلندمدت قرار دارد و رفتار آن از نوع نمایی حافظه‌دار ($Y=\lambda e^{-\lambda X}$) است.

در صورتی‌که شدت‌های مورفوتکتونیکی حوضهٔ سفیدرود بر اساس داده‌های ژئومورفولوژیکی روی محور X و درصد گروه‌بندی‌شده بر اساس نسبت طلایی فیبوناچی روی محور Y رسم شوند، نمودار گامای حوضه از لحاظ شدت فعالیت‌های تکتونیکی قابل تحلیل خواهد بود. تمام مشخصه‌های احتمالی تکتونیکی حوضه در بخش‌های قبلی محاسبه شده‌اند و می‌توان آن‌ها را به‌صورت شهودی در نمودار شکل ۵ مشاهده کرد.

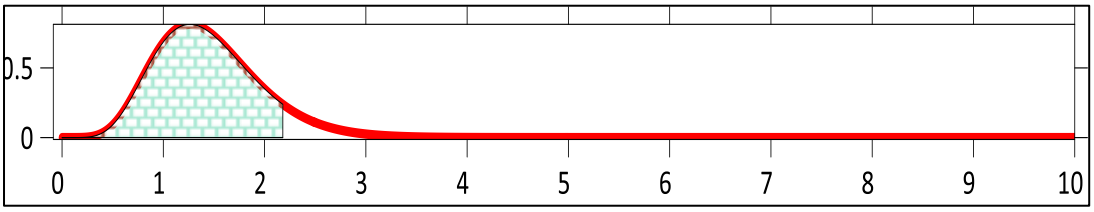


شکل ۵- نمودار PDF گامای حوضه‌ی ژئومورفیک سفیدرود از لحاظ شدت فعالیت‌های تکتونیکی

Fig. 5. PDF plot of the Sefidrood geomorphic basin gamma in terms of the intensity of tectonic activities

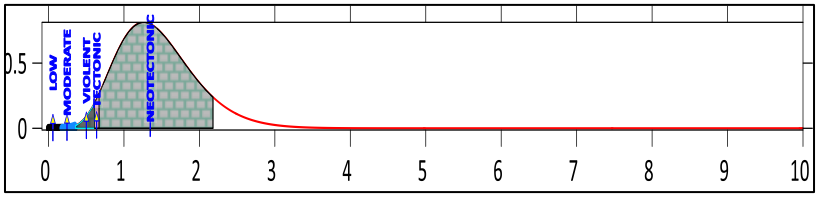
با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده، دامنه تغییرات شدت فعالیت‌های مورفوتکتونیکی حوضه سفیدرود ـ بر اساس ساختار طلایی فیبوناچی ـ از ۰/۰۰۰۳ تا ۲/۱۸۵ واحد نسبت طلایی تعیین شد. این بازه در مقایسه با دامنه نظری توزیع گاما (که از صفر تا بی‌نهایت مثبت قابل تعریف است)، نشان‌دهنده عدم وجود نوسانات بسیار شدید در ساختارهای تکتونیکی حوضه است. لذا، می‌توان فرض کرد که حوضه از دوره تریاس تاکنون تحت فشار تکتونیکی نسبتاً پایداری قرار داشته است. برای تجسم بهتر موقعیت ژئومتریک الگوهای فیبوناچی شدت تکتونیک در حوضه سفیدرود، نمودار شکل ۶ با کاهش بزرگنمایی عرضی ترسیم شد. این نمودار محدودهٔ فعالیت‌های مورفوتکتونیکی حوضه را به‌خوبی مجسم می‌کند و به عنوان یک ابزار تصویری درک عمیق‌تر از توزیع فضایی فعالیت‌های تکتونیکی فراهم می‌کند.

شکل ۷ همچنین نمودار گامای کولموگروف شده پیرسون خطی حوضهٔ سفیدرود را نشان می‌دهد. این نمودار از روی PDF گاما ترسیم شده است. در این بخش، تمرکز بر روی محدوده ضعیف فعالیت مورفوتکتونیکی است.



شکل ۶- محدودهٔ فعالیت‌های مورفوتکتونیک حوضهٔ سفیدرود با اغراق عرضی کمتر از شکل ۵

Fig. 6. The extent of morphotectonic activities of the Sefidrood basin with less lateral exaggeration than Fig. 5



شکل ۷- محدودهٔ ترسیمی فیبوناچی مورفوتکتونیک ضعیف حوضهٔ سفیدرود

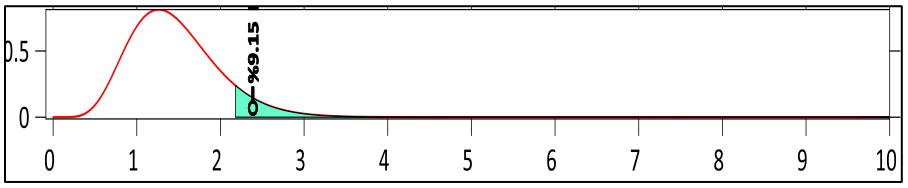
Fig. 7. Weak morphotectonic Fibonacci plot area of the Sefidrood basin

برای ارزیابی دقت و اعتبار نتایج برداشت‌های مورفوتکتونیکی، میزان خطا در داده‌های به‌دست‌آمده با استفاده از توابع تجمعی گاما (CDF) محاسبه شد. این خطا از دو جهت (چپ و راست) بررسی شد:

$$p(x < 0.0003) = 0.00030936 \int_{0}^{0.0003} 4661145.84x^{6.778}e^{-5.37x}dx$$

$$p(x > 0.0003) = 0.00030936 \int_{2.185}^{\infty} 4661145.84x^{6.778}e^{-5.37x}dx$$

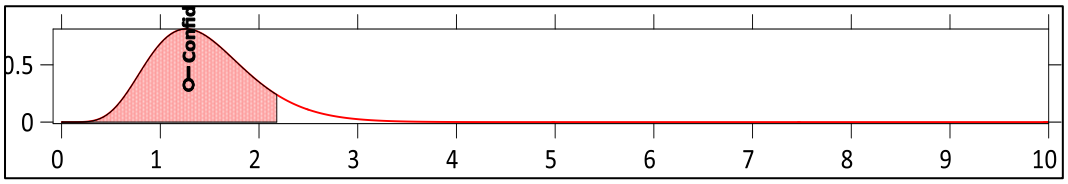
نتایج نشان دادند که مقدار خطای چپ منحنی تنها $3.88 * 10^{-12}$ درصد است، که در عمل قابل صرف‌نظر کردن است. این موضوع مؤید آن است که داده‌های مورفوتکتونیکی در دنباله چپ منحنی با دقت بسیار بالایی بدون خطا استخراج شده‌اند (شکل ۸).



شکل ۸- نمودار شهودی میزان خطای داده‌های مورفوتکتونیکی حوضهٔ سفیدرود

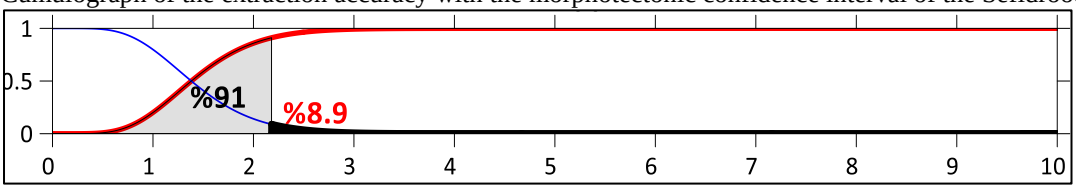
Fig. 8. Intuitive plot of the error rate of morphotectonic data of the Sefidrood basin

تحلیل‌های گامایی نشان دادند که دقت کلّی برداشت‌ها حدود ۹۰/۸۵ درصد است. این مقدار از طریق محاسبه CDF و با توجه به محدوده داده‌ها به‌دست آمد. همچنین، در صورت ادامه‌دار بودن نمودار CDF به سمت دنباله راست منحنی (حداقل دقت)، خطای دوطرفه به‌صورت بالقوه بیش از ۸/۹ درصد می‌تواند رخ دهد. این خطا به‌عنوان یک فاصله اطمینان ۹۹درصد در تحلیل‌های آماری مطرح شد. نتایج اعتبارسنجی، بیانگر دقت بالای روش‌های استفاده شده و قابلیت اعتماد مناسب نتایج است (شکل ۹ و ۱۰). در این تحقیق، تمام تحلیل‌های تجمعی در حیطه توزیع گاما انجام شد. نکته مهم این است که توزیع گاما از نوع توزیع‌های نمایی است و بنابراین، انتگرال‌گیری از آن باید به‌صورت معین و در بازه‌های مشخص انجام شود. همچنین، مشخص شد که CDF مثبت و منفی استخراج شده از روند فعالیت‌های مورفوتکتونیکی حوضه سفیدرود، نسبت به یکدیگر متمم هستند ($P(X<x)+P(X>x)=1$). این رابطه نشان‌دهندهٔ سازگاری کامل داده‌ها با ساختار آماری گامایی و همچنین عدم وجود انحرافات غیرمنطقی در داده‌ها است.



شکل ۹- کومولوگراف دقت برداشت یا فاصلهٔ اطمینان مورفوتکتونیکی حوضهٔ سفیدرود

Fig. 9. Cumulograph of the extraction accuracy with the morphotectonic confidence interval of the Sefidrood basin



شکل ۱۰- کومولوگراف حداقل و حداکثر کمیت فعالیت مورفوتکتونیکی حوضهٔ سفیدرود

Fig. 10. Cumulogram of minimum and maximum quantity of morphotectonic activity of the Sefidrood basin

میزان وابستگی زیرحوضه‌ها به حوضهٔ اصلی (تحلیل کای دو)

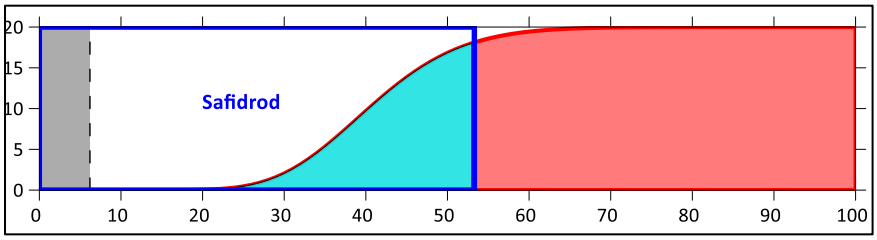
پس از تأیید تعادل دینامیکی حوضهٔ سفیدرود با استفاده از توزیع گاما، لازم بود رابطهٔ وابستگی هر زیرحوضه به حوضهٔ اصلی از طریق روش‌های آماری استنباطی نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور، از آزمون کای دو استفاده شد. در این پژوهش، مقایسه جبر احتمالاتی گشتاور دوم حول میانگین (M_2) بین زیرحوضه‌ها و حوضهٔ اصلی نشان داد که:

$$\frac{(n-1)S^2}{\sigma^2} \sim x^2(n-1)$$

S^2 واریانس (گشتاور دوم حول میانگین) زیرحوضه، σ^2=0.27 گشتاور دوم حول میانگین حوضهٔ اصلی و n تعداد نقاط برداشت‌شده در هر زیرحوضه است. این آزمون امکان استنتاج آماری دربارهٔ وابستگی یا استقلال زیرحوضه‌ها به حوضهٔ اصلی را فراهم کرد.

تحلیل کای دو نشان داد که اکثر زیرحوضه‌ها از نظر فعالیت‌های مورفوتکتونیکی مستقل از حوضهٔ اصلی هستند. مقادیر محاسبه‌شده $\chi 2$ برای زیرحوضه‌ها بین ۶/۲ تا ۵۳ متغیر بودند، که نشان‌دهندهٔ وجود تفاوت معنادار در نحوهٔ توزیع فعالیت‌های تکتونیکی و نئوتکتونیکی در مقایسه با حوضه اصلی است. در نمودار شکل ۱۱، توزیع CDF و PDF کای دو به‌صورت شهودی نمایش داده شده است. محور افقی این نمودار بازهٔ عددی ضریب کای دو (۰ تا ۶/۲) و محور عمودی تابع چگالی و تجمعی احتمال است. این نمودار برجسته می‌کند که تنها زیرحوضه سفیدرود با مقدار χ^2=۵۳ در سطح معناداری ۹۹٪ قرار دارد و بنابراین، رابطه سیستمی معناداری با حوضهٔ اصلی دارد. در مقابل، زیرحوضه رودشور در خارج از این ساختار واقع شده و فاقد هرگونه همبستگی آماری یا سیستمی با حوضهٔ مادر است. این موضوع در سمت چپ نمودار با ناحیه خاکستری خط‌چین‌دار مشخص شده است.

این یافته، برجسته می‌کند که آن‌ها تحت تأثیر یک سیستم سایبرنتیکی منسجم و حافظه‌دار منفی قرار دارند که به سمت سطح اساس (دریای خزر) در حال تنظیم است. این ترکیب از استقلال ساختاری و هماهنگی سیستمی یکی از یافته‌های کلیدی این مطالعه است. این پدیده به ما کمک می‌کند تا بفهمیم چگونه یک حوضه با ساختارهای پیچیده تکتونیکی می‌تواند هم در سطوح محلی مستقل عمل کند و هم در چارچوب یک سیستم کلان منسجم باشد. در مقابل، تشابه ساختاری و هماهنگی سیستمی بین زیرحوضه‌ها (با نسبت فیشر بین ۴/۴ تا ۵/۵) نیز برجسته می‌کند که هر زیرحوضه در یک ساختار ارگودیک کلان عمل می‌کند. این پدیده یکی از مواردی است که تاکنون به‌خوبی در مطالعات قبلی مورد توجه قرار نگرفته است. این یافته می‌تواند زمینه‌ساز مطالعات بیشتر دربارهٔ ارتباط بین سیستم‌های زیرحوضه‌ای و ساختارهای تکتونیکی کلان شود.



شکل ۱۱- نمودار CDF کای دو ـ مقایسه گشتاور دوم حول میانگین تمام زیرحوضه‌ها با حوضه اصلی

Fig. 11. Chi-square CDF plot comparing the second moment around the mean of all subbasins with the main basin

با توجه به یافته‌های فوق، می‌توان گفت: ۱- حوضهٔ سفیدرود در یک ساختار ارگودیک بلندمدت تحت تأثیر یک سیستم سایبرنتیکی واحد قرار دارد. ۲- با این حال، زیرحوضه‌ها به‌طور کلی از نظر فعالیت‌های مورفوتکتونیکی مستقل هستند و هر کدام تحت تأثیر عوامل محلی خاص خود عمل می‌کنند. ۳- تنها زیرحوضهٔ سفیدرود با داشتن نسبت گشتاور دوم حول میانگین برابر با ۵۴/۳۶، در محدودهٔ استنباط آماری کای دو قرار داشته و در تعامل سیستمی با حوضهٔ اصلی است. ۴- زیرحوضه رودشور در سمت چپ نمودار و در ناحیهٔ خاکستری خط‌چین‌دار قرار دارد که بیانگر عدم وجود هیچ گونه اشتراک سیستمی با حوضهٔ اصلی است.

این استقلال نسبی زیرحوضه‌ها در کنار وجود یک ساختار ارگودیک کلان، نشان‌دهندهٔ دوگانگی مهم در نحوهٔ تحول مورفوتکتونیکی حوضه است: ۱- مستقل بودن زیرحوضه‌ها از منظر فعالیت محلی و ۲- وابستگی کلی آن‌ها به یک الگوی سایبرنتیکی مشترک.

در شکل ۱۱، تمام زیرحوضه‌های حوضهٔ سفیدرود در محور طولی (X) و با توجه به مقدار χ^2 به‌صورت گرافیکی قابل مقایسه هستند. این مقایسه نشان می‌دهد: ۱- اگر نسبت گشتاور دوم حول میانگین زیرحوضه‌ها تا مقدار ۵۵ روی محور X قرار می‌گرفت، وضعیت مورفوتکتونیکی آن‌ها با حوضهٔ اصلی کاملاً مشابه می‌شد. ۲- اما با توجه به موقعیت واقعی آن‌ها، هر زیرحوضه دارای الگوی فعالیت تکتونیکی منحصر به فردی است.

این یافته‌ها اهمیت رویکرد منطقه‌محور در مدیریت خطرات طبیعی و برنامه‌ریزی شهری و زیرساختی را برجسته می‌کنند، زیرا هر زیرحوضه ممکن است نیازمند رویکردی متفاوت در مطالعات بعدی باشد.

استقلال یا وابستگی زیرحوضه‌ها با تحلیل فیشر

در این قسمت، به منظور بررسی رابطهٔ آماری بین زیرحوضه مورفوتکتونیکی زنجانرود و دیگر زیرحوضه‌های حوضه ژئومورفولوژیکی سفیدرود، از روش تحلیل توزیع فیشر استفاده شده است. این روش کاربرد گسترده‌ای در مقایسه واریانس‌های دو جامعه دارد و در این پژوهش، به عنوان شاخصی برای استقلال یا وابستگی ساختارهای مورفوتکتونیکی میان زیرحوضه زنجانرود و سایر زیرحوضه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

با توجه به اینکه کمیت‌های مورفوتکتونیکی استخراج‌شده از ساختار نسبت طلایی فیبوناچی دارای ماهیت پیوسته هستند، استفاده از روش‌های گامایی و فیشر ضروری است. در مقابل، در صورت گسسته بودن داده‌ها، می‌توان از روش‌های متداول‌تری مانند واریانس نمونه‌ای استفاده کرد.

داده‌های مورد نیاز شامل مختصات UTM، ارتفاعات و شاخص‌های مورفوتکتونیکی (TEC) استخراج‌شده از ساختار فیبوناچی است. این داده‌ها در مرحله بعدی تحت تحلیل‌های آماری و با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی و محاسبه گشتاورهای حول میانگین قرار گرفتند.

محاسبه تابع CDF پیرسون خطی برای زیرحوضه زنجانرود

در این مرحله، با استفاده از داده‌های شاخص مورفوتکتونیکی زیرحوضه زنجانرود، تابع CDF پیرسون خطی محاسبه شد. این رابطه، به صورت زیر است:

$$B = ((34 * 232) - (595^2))/((34 * 4.027) - (10.1391^2)) = 54.36$$
$$a = (((595) - (54.36 * 10.13))/34) = 1.287$$

بنابراین، معادله خط رگرسیون به صورت Y=54.36X+1.288 خواهد بود؛ که در آن Y معادل PDF و در نهایت CDF و X متغیر شاخص مورفوتکتونیکی زیرحوضه زنجانرود است. این رابطه نشان‌دهندهٔ همبستگی بالای خطی (۰/۹۵۲) بین داده‌های مورفوتکتونیکی زیرحوضه زنجانرود است که اعتبار ساختار آماری را تأیید می‌کند.

ارگودیک‌سازی PDF و محاسبه امید ریاضی

پس از محاسبه تابع رگرسیون خطی، اقدام به چگال‌سازی و انتگرال‌گیری از تابع فوق شد.

$$f(X) = \int_{0.147}^{0.808} (54.36X + 1.288)dx = 18.748$$

در ادامه، PDF به‌صورت زیر نرمال‌سازی شد:

$$fX^{(x)} = PDF = \left(\frac{1}{18.748}\right) * \int_{0.147}^{0.808} (54.36X + 1.288)dx = 1$$

و امید ریاضی(E(X)) برای زیرحوضه زنجانرود به‌صورت زیر محاسبه شد:

$$E(X) = \int_{0.147}^{0.808} (x) * (2.9X + 0.0687)dx = 0.532$$

این مقدار برابر با گشتاور اول زیرحوضه زنجانرود است. با توجه به پیوسته بودن داده‌ها، این مقدار در مقایسه با روش‌های گسسته (مانند میانگین)، دقت بالاتری دارد.

محاسبهٔ گشتاور دوم حول میانگین و انحراف استاندارد

در این بخش، گشتاور دوم حول میانگین زیرحوضه زنجانرود به‌صورت زیر محاسبه شد:

$$E(X^2) = \int_{0.147}^{0.808} (x - 0.532)^2 * (2.9X + 0.0687)dx = 0.0379$$

این مقدار هم ارز واریانس در یک توزیع گسسته است. بنابراین، انحراف معیار نیز به‌صورت زیر محاسبه گردید:

$$STDEV.P = \sqrt{0.0379} = 0.194$$

این مقادیر، به‌عنوان ورودی‌های اصلی در تحلیل فیشر مورد استفاده قرار گرفتند.

تحلیل فیشر و مقایسه زیرحوضه‌ها

در این مرحله، برای مقایسه زیرحوضه زنجانرود با دیگر زیرحوضه‌های حوضهٔ سفیدرود، از توزیع فیشر استفاده شد. این توزیع بر اساس نسبت واریانس‌های دو جامعه ($F = \frac{\sigma^2}{S^2}$) محاسبه می‌شود.

که در آن σ^2=۰/۰۳۹۷ گشتاور دوم حول میانگین زیرحوضه زنجانرود و S^2 گشتاور دوم حول میانگین هر زیرحوضه است. این تحلیل به ما کمک می‌کند تا بفهمیم: ۱- آیا دو زیرحوضه تحت یک ساختار سیستمی واحد عمل می‌کنند؟ ۲- آیا تفاوت‌های موجود در سطح معنایی قابل قبول هستند؟

آزمون فرض آماری با استفاده از توزیع F

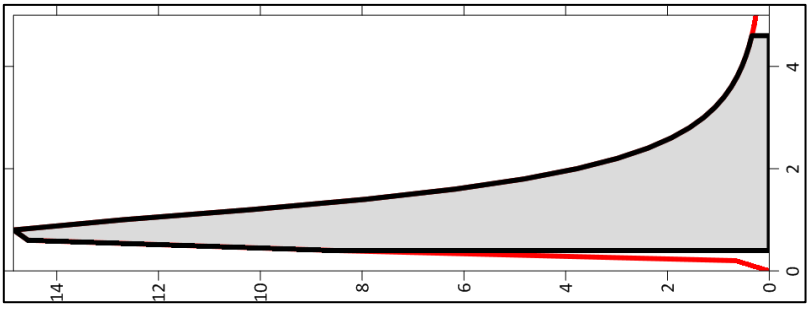
دو فرض آماری $H_0: \sigma^2 = F$ و $H_1: \sigma^2 \neq F$ در این تحقیق مطرح شد. در صورتی که نسبت فیشر محاسبه‌شده در فاصله اطمینان ۹۵درصد قرار گیرد، فرض H_0 مورد قبول واقع می‌شود و این برجسته می‌گردد که دو زیرحوضه تحت یک ساختار سایبرنتیکی مشترک عمل می‌کنند. در غیر این صورت، فرض H_1 مورد تأیید قرار می‌گیرد و نشان‌دهندهٔ استقلال ساختاری دو زیرحوضه است. تحلیل فیشر بر روی زوج‌های زیرحوضه زنجانرود و دیگر زیرحوضه‌ها (مانند رودشور و حلب) انجام شد. در این راستا، جدول ۱ شامل نسبت‌های فیشر، گشتاورها، درصد توزیع PDF و CDF تهیه شد.

جدول ۱- نتایج تحلیل فیشر بین زیرحوضه زنجانرود و سایر زیرحوضه‌ها

Table 1- Results of Fisher analysis between Zanjanroud subbasin and other subbasins

زیرحوضه Sub basin	گشتاور دوم حول میانگین The second moment around the mean	نسبت فیشر (F) Fisher ratio	درجه آزادی(Df) Degree of freedom	%CDF	وضعیت آماری Statistical situation
زنجانرود Zanjanrood	0.0397	—	34	—	حوضه مادر Main basin
حلب Halab	0.0086	4.4	6	99.1	وابسته Dependent
دیواندره Divandareh	0.0091	4.1	10	98.7	وابسته Dependent
رودشور Rode-shor	0.0062	6.2	12	91.3	مستقل Independent

در شکل ۱۲، نمودار توزیع فیشر با درجه آزادی k=۶ برای زیرحوضه حلب و l=۳۴ برای زیرحوضهٔ زنجانرود نمایش داده شد. در این نمودار محور افقی (۴-۰) نسبت گشتاور دوم حول میانگین(F) و محور عمودی (۱۴-۰) درصد تجمعی CDF و PDF است (چرخش نمودار). نتایج نشان دادند که نسبت فیشر محاسبه‌شده برای زیرحوضه‌های زنجانرود و حلب برابر با ۴/۴ است. این مقدار در سطح اطمینان ۹۹درصد قرار داشته و نشان‌دهندهٔ وابستگی سیستمی بین این دو زیرحوضه است.



شکل ۱۲- نمودار توزیع فیشر برای زیرحوضه حلب و زیرحوضه زنجانرود

Fig. 12. Fisher distribution plot for Halab subbasin and Zanjanrud subbasin

در توزیع فیشر، مقدار کلی PDF به صورت زیر محاسبه شد:

$$fX^{(x)} = PDF = \left(\frac{1}{18.748}\right) * \int_{0.147}^{0.808} (54.36X + 1.288)dx = 1$$

که در آن k و l درجه آزادی زیرحوضه‌های مقایسه‌شده، برای نمونه برای زنجانرود و حلب به ترتیب ۶ و ۳۴ برآورد گردید و Γ تابع گاما است. نتایج نشان دادند که ۱- تمام زیرحوضه‌ها در فاصله اطمینان ۹۹ درصد قرار دارند. ۲- این موضوع بیانگر تشابه ساختاری و تعامل سیستمی بین زیرحوضه زنجانرود و دیگر زیرحوضه‌هاست.

این موضوع نشان می‌دهد که زیرحوضه زنجانرود و حلب تحت تأثیر یک ساختار سایبرنتیکی واحد قرار دارند و الگوی تکتونیکی آن‌ها مشابه است. در مقابل، زیرحوضه رودشور در ناحیه خاکستری خط‌چین‌دار و در سمت چپ نمودار واقع شد و فاقد هرگونه همبستگی سیستمی با زیرحوضه زنجانرود بود.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با استفاده از تحلیل‌های گامایی، روش‌های فیبوناچی و آمارهای پیشرفته‌ی ساختاری، به بررسی وضعیت مورفوتکتونیکی و نئوتکتونیکی حوضهٔ سفیدرود در شمال‌غرب ایران پرداخت. نتایج این پژوهش، علاوه بر تأیید تعادل دینامیکی عمومی حوضه، امکان شناسایی الگوهای منظم و قابل پیش‌بینی در فعالیت‌های زمین‌ساختی و هندسه طبیعی را فراهم کرد. این رویکرد جامع، اولین بار در این حوضه و با استفاده از تلفیق الگوهای ریاضی - آماری با داده‌های ژئومورفولوژیکی انجام شده است. تحلیل‌های گاما، چولگی و کشیدگی داده‌ها نشان دادند که حوضهٔ سفیدرود در حالت تعادل دینامیکی قرار دارد. این نتایج نشان می‌دهد که توزیع فعالیت‌های مورفوتکتونیکی در حوضه بدون نوسانات شدید و ناپایداری‌های ساختاری است. بنابراین، حوضه در معرض تحولات سریع و خطرناک تکتونیکی نیست و بیشتر منطقه تحت فشارهای بلندمدت و متوازن قرار دارد. تحلیل کای دو نشان داد که زیرحوضه‌های حوضهٔ سفیدرود از نظر فعالیت‌های مورفوتکتونیکی مستقل هستند. مقادیر χ^2 برای زیرحوضه‌ها بین ۶/۲ تا ۵۳ متغیر بودند، که برجسته می‌کند هر زیرحوضه تحت تأثیر عوامل محلی خاص خود قرار دارد و نمی‌توان الگوی واحدی را برای تمامی آن‌ها در نظر گرفت. نکتهٔ کلیدی این نتیجه، شناسایی ترکیب منحصربه‌فردی از استقلال ساختاری و هماهنگی سیستمی در زیرحوضه‌هاست. آزمون‌های آماری کای دو و فیشر نشان دادند که اگرچه زیرحوضه‌ها از نظر فعالیت مورفوتکتونیکی مستقل عمل می‌کنند، اما تمام آنها در فاصله اطمینان ۹۹٪ قرار دارند و تحت تأثیر یک ساختار ارگودیک کلان و سایبرنتیکی مشترک هستند. این پدیده که در مطالعات پیشین به‌ندرت مورد توجه قرار گرفته نشان می‌دهد که حوضه‌های درون‌کوهی می‌توانند همزمان هم محلی و هم منسجم باشند، یک مفهوم که با نظریه‌های ترنر (Turner, 1999) دربارهٔ هندسه فضایی دنبالهٔ فیبوناچی هم‌خوانی دارد. نتایج اعتبارسنجی با فاصله اطمینان ۹۰/۸۵٪ و خطای دوطرفه کمتر از ۸/۹٪، دقت بالا و قابلیت اعتماد مناسب روش‌های به‌کاررفته را تأیید می‌کند. این مطالعه نه تنها از کاربرد نوین الگوهای فیبوناچی و توزیع گاما در تحلیل مورفوتکتونیکی دستاورد، بلکه چارچوبی کمّی و قابل تعمیم برای درک پویایی حوضه‌های درون‌کوهی در مناطق فعال تکتونیکی ارائه می‌دهد. یکی از مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق، محدودیت فعالیت‌های نئوتکتونیکی در حوضه سفیدرود است. فقط ۴ درصد از حوضه، در محدوده نئوتکتونیک قرار دارد. این محدودیت فعالیت‌های نئوتکتونیکی به ما کمک می‌کند تا مناطق بالقوه خطرناک را شناسایی کنیم و برنامه‌ریزی‌های عمرانی و محیطی را به‌صورت منطقه‌محور و غیرسراسری انجام دهیم. تحلیل‌های آماری و هندسی نشان دادند که حوضهٔ سفیدرود تحت تسلط یک سیستم ارگودیک و سایبرنتیکی قرار دارد. این ساختار ارگودیک بیانگر تعادل بلندمدت و پایداری ساختاری است که در آن فعالیت‌های تکتونیکی به‌طور خودبه‌خودی به سمت یک وضعیت تعادلی حرکت می‌کنند. این سیستم به عنوان یک ساز و کار خودتنظیم‌کننده عمل می‌کند که می‌تواند درک عمیق‌تری از نحوه تحول ساختارهای زمین‌ساختی فراهم کند. این یافته نشان می‌دهد که حوضهٔ سفیدرود، علی‌رغم پیچیدگی‌های زمین‌ساختی، در مجموعه‌ای از قوانین هندسی و آماری عمیق قرار دارد که می‌تواند در مدل‌سازی ساختاری و پیش‌بینی خطرات بلندمدت کاربرد داشته باشد.

References

Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., & Mouthereau, F. (2005). Convergence history across Zagros (Iran): Constraints from collisional and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences, 94*(3), 401–419. https://doi.org/10.1007/s00531-005-0481-4

Allen, M. B., Ghassemi, M. R., Shahrabi, M., & Ashi, M. (2003). Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. *Journal of Structural Geology*, *25*(5), 659–672. https://doi.org/10.1016/S0191-8141 (02)00064-0

Asadpour, A. (2018). Recovering the spatial structure and planting plan of Sa'ad al-Jang garden in Shiraz based on Trens Odanell's memories [Spatial analysis of historical gardens]. *Journal of Warm and Arid Architecture, 7,* 23–42. [In Persian] https://doi.org/10.29252/ahdc.2018.1421

Berberian, M. (1983). The southern Caspian: a compressional depression floored by a trapped, modified oceanic crust. *Canadian Journal of Earth Sciences, 20*(2), 163–183. https://doi.org/10.1139/e83-015

Berberian, M. (1995). Master "blind" thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics, 241*(3-4), 193-224. https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)00185-C

Berberian, M., & King, G. C. P. (1981). Towards a Paleogeography and Tectonic Evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences, 18*(2), 210–265. https://doi.org/10.1139/e81-019

Bililan, L., & Hassanpour Lamr, S. (2019). Geometric patterns and golden proportions: A common language of architecture and art in the historical village of Abyaneh. *Journal of Warm and Arid Architecture, 9,* 45–68. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26453711.1398.7.9.3.2

Doglioni, C. (1990). The global tectonic pattern. *Journal of Geodynamics*, *12*(1), 21-38. https://doi.org/10.1016/0264-3707(90)90022-M

Feizolahbeigi, A., Lourenço, P. B., Golabchi, M., Ortega, J., & Rezazadeh, M. (2021). Discussion of the role of geometry, proportion and construction techniques in the seismic behavior of 16th to 18th century bulbous discontinuous double shell domes in central Iran. *Journal of Building Engineering*, *33*, 101575. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101575

Guest, B., Horton, B. K., Axen, G. J., Hassanzadeh, J., & McIntosh, W. C. (2007). Middle to late Cenozoic basin evolution in the western Alborz Mountains: Implications for the onset of collisional deformation in northern Iran. *Tectonics, 26*(6). https://doi.org/10.1029/2006TC002091

Hashemi Zarjabad, H., Ziaieniya, M. H., & Ghorbani, H. R. (2015). Revisiting the Analysis of Geometrical Principles and Golden Proportions in Shokatieh School. *Iranian Journal of Archaeological Studies, 5*(9), 207–222. [In Persian] https://journals.basu.ac.ir/article_1296.html

Kalman, D., & Mena, R. (2003). The Fibonacci numbers—exposed. *Mathematics Magazine*, *76*(3), 167-181. https://doi.org/10.1080/0025570X.2003.11953176

Khattab, M. A., Radwan, A. E., El-Anbaawy, M. I., Mansour, M. H., & El-Tehiwy, A. A. (2023). Three-dimensional structural modelling of structurally complex hydrocarbon reservoir in October Oil Field, Gulf of Suez, Egypt. *Geological Journal*, *58*(11), 4146-4164. https://doi.org/10.1002/gj.4748

Makar, K., & Rubin, A. (2017). Learning about statistical inference. *International Handbook of Research in Statistics Education*, 261-294. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66195-7_8

Marples, C. R., & Williams, P. M. (2022). The golden ratio in nature: A tour across length scales. *Symmetry*, *14*(10), 2059. https://doi.org/10.3390/sym14102059

Mehrnia, S. R. (2017). Identifying Spatial Patterns of Earthquakes in Western Iran Using the Fibonacci Method. *Environmental Risk Management Journal, 4*(3), 215–229. [In Persian] https://journals.ut.ac.ir/article_64799.html

Memarzadeh, R., Hosseinzadeh Lotfi, F., Jahanshahlu, L., & Dehqan Toranposhti, A. (2022). Ranking Fire Stations Using Fibonacci sequence Technique: Case Study—District 10, Tehran. *Operations Research in Engineering Applications (Applied Mathematics), 19*(72), 99-122. [In Persian] http://dx.doi.org/10.52547/jamlu.19.1.99

Mohajjel, M., & Fergusson, C. L. (2014). Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran. *International Geology Review*, *56*(3), 263-287. https://doi.org/10.1080/00206814.2013.853919

Nassef, A. S. E. (2015). Fibonacci sequence and golden ratio in new formula of predicting cracks propagation in reinforced concrete tie. *International Journal of Damage Mechanics*, *24*(8), 1214-1226. https://doi.org/10.1002/suco.201300077

Radfar, A., Chakdel, A. R., Nejati, A., Soleimani, M., & Taati, F. (2019). New insights into the structure of the South Caspian Basin from seismic reflection data, Gorgan Plain, Iran. *International Journal of Earth Sciences*, *108*, 379-402. https://doi.org/10.1007/s00531-018-1659-x

Salehipoor Milani, A., Yamani, M., Moghimi, E., Lak, R., Jafarbigloo, M., & Mohamadi, A. (2018). Effect of The Urmia Lake level fluctuations Based on lake terraces sediments characteristics. *Quantitative Geomorphological Research*, *6*(1), 1-20. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1396.6.1.1.8

Scholz, C. H., & Aviles, C. A. (1986). The fractal geometry of faults and faulting. *Earthquake Source Mechanics*, *37*, 147-155. https://doi.org/10.1029/GM037p0147

Scholz, C. H., Dawers, N. H., Yu, J. Z., Anders, M. H., & Cowie, P. A. (1993). Fault growth and fault scaling laws: Preliminary results. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *98*(B12), 21951-21961. https://doi.org/10.1029/93JB01008

Sharma, V. (2009). Deterministic chaos and fractal complexity in the dynamics of cardiovascular behavior: perspectives on a new frontier. *The Open Cardiovascular Medicine Journal*, *3*, 110. https://doi.org/10.2174/1874192400903010110

Stepanov, P. Y., & Gomanyuk, J. A. (2023). Mathematical modeling of seismic wave kinematics in complex media. *Moscow University Geology Bulletin*, *78*(1), 167-179. https://doi.org/10.3103/S0145875223010179

Tiwari, J., Goswami, P. K., & Bhakuni, S. S. (2021). Pattern of active crustal deformation in a part of a lesser Himalayan Tectonic Window, Himachal Pradesh, India. *Quaternary International*, *592*, 111-120. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.03.043

Turner, J. C. (1999). On Vector Sequence Recurrence Equations in Fibonacci Vector Geometry. In *Applications of Fibonacci Numbers: Volume 8* (pp. 353-368). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4271-7_32

Turner, J. C., & Shannon, A. G. (1998). Introduction to a Fibonacci geometry. In *Applications of Fibonacci Numbers: Volume 7* (pp. 435-448). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5020-0_48

Waldron, J., & Snyder, M. (2020). Geological Structures: A practical introduction. https://doi.org/10.7939/r3-x15j-kd13

Yin, A. (2010). Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis. *Tectonophysics*, *488*(1-4), 293-325. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.06.002

Yin, A., & Harrison, T. M. (2000). Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, *28*(1), 211-280. https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211

Ziaieniya, M. H., & Hashemi Zarjabad, H. (2016). The Golden Proportion and System of Islamic– Iranian proportions in Qaen Mosque. *Journal of Maremat & Memari-e Iran, 6*(11), 89-100. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453850.1395.6.11.7.0

Vol.14, No.4, Winter 2025, p. 43-65 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.93699.1573 OPEN ACCESS

Channel Changes and Bank Erosion in the Khoramroud River During the Period 2006–2025

Mohammad Mahdi Hosseinzadeh [1], **Shahram Amiri** [2*]

[1] Associated Professor, Department of Physical Geography, Earth Sciences Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

[2] Ph.D. student, Department of Physical Geography, Earth Sciences Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 26 May 2025

Revised: 11 Auhust 2025

Accepted: 12 August 2025

Available Online: 14 August 2025

Keywords:

Channel Morphodynamics

River Planform Changes

Bank Erosion

Channel Migration

Khorramroud River

ABSTRACT

The Khoramroud River has undergone significant morphological changes with diverse consequences over the past few decades. Therefore, this study aims to investigate and analyze evolutionary trends, assess the changes that have occurred, and determine the relationship between these trends and their controlling factors across four time periods (2006–2025). The objective is to facilitate effective river management and mitigate adverse impacts in two distinct reaches: the first reach spans 16,700 meters and is divided into six sub-reaches (17 cross-sections), while the second reach extends 17,212 meters and is subdivided into seven sub-reaches (18 cross-sections). For this study, hydrometric data from two stations Bahram Jo (Section 1) and Cham Anjir (Section 2) were used, along with topographic maps, Google Earth satellite imagery, field observations, and surveys conducted in these sections to analyze channel dynamics and planform changes. The results indicated that the highest average periodic variations in centerline and channel displacement for both sections occurred during the second time interval (2017–2019). The findings from the first section (2006–2025) revealed a reduction in channel width due to river erosion, whereas the second section exhibited not only erosion but also bank erosion, leading to floodplain formation and subsequent river widening. A comparative analysis of the two sections demonstrated varying degrees of vulnerability in agricultural lands and rural settlements along both river segments. However, the vulnerability level in the first section was significantly higher and more pronounced than in the southern portion of the study area, primarily due to the downstream location of Khorramabad City.

* Corresponding author: Shahram Amiri E-mail address: s.amiri2010@yahoo.com

How to cite this article: Hosseinzadeh, M. M., & Amiri, S. (2025). Channel Changes and Bank Erosion in the Khoramroud River During the Period 2006–2025. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(4), 43-65. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.93699.1573

©2025 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 exploitation of environmental resources necessitates a conscientious and protective approach, one that pursues development and sustainability concurrently. Alluvial rivers are dynamic landscape components that react to alterations in flow, sediment, vegetation cover, and climatic conditions. Fundamentally, channel dynamics govern the structure and function of river and floodplain ecosystems. In recent decades, intensified human activities and modified hydrological regimes have driven significant transformations in river systems worldwide. While natural fluvial variability is essential for ecological balance, a pronounced increase in anthropogenic interventions has extensively altered natural river courses. Consequently, many rivers are now experiencing substantial adjustments in width and depth. These changes present considerable challenges for nations worldwide, impacting policymakers, resource managers, and communities reliant on these aquatic systems. The long- and short-term consequences of river system alterations are particularly acute in densely populated mountainous regions, where land scarcity and high population density amplify risks. Thus, this issue remains a persistent and critical challenge in environmental management discourse.

As a mountain river, the Khoramroud River has undergone significant morphological changes in recent decades, each with distinct environmental and societal implications. To date, no comprehensive study has quantified the scope and drivers of these changes. This research therefore aims to (1) examine evolutionary trends, (2) quantify the magnitude of morphological change, and (3) identify the relationship between these trends and their controlling factors from 2006 to 2025. The findings are intended to inform improved river management strategies and mitigate adverse impacts.

Material and Methods

Study Area: The study area encompasses a 34-km segment of the Khorramrod River, located within and adjacent to the city of Khorramabad. It is divided into two sections: a northern segment (Reaches 1–7) and a southern segment (Reaches 8–13). The northern section, extending approximately 16,700 m, runs parallel to the Khorramabad–Kermanshah road from Darhoz Village to the Falak al-Din Martyrs Bridge. The southern section spans approximately 17,250 m, from the Yadgar Imam Bridge at the city's downstream limit to the Kesht e Sanat Complex Bridge.

Based on data from the Bahram Jo and Cham Anjir hydrometric stations (2004–2024), the river's average discharge is 2.02 m^3/s and 7.87 m^3/s, respectively. Geologically, the area lies within the Lorestan region of the Zagros folded thrust belt, northwest of the Dezful depression. The oldest exposed formation in the core of the Khorramabad anticline is the Gro formation.

Climatic data from the Khorramabad meteorological station show a mean annual precipitation of 517 mm and a mean annual temperature of 16.8 °C. According to the De Martonne aridity index, the regional climate is classified as semiarid (Mediterranean type).

Data Collection: This study investigated morphological changes in the Khorramrod River channel between 2006 and 2025. Data were collected through field surveys, direct observations, and physical measurements. Spatial data were processed and digitized using ArcGIS software.

Given the river's length and the central position of Khorramabad city, the study area was divided into northern and southern sections. Following the reach scale analysis framework of Rinaldi (2013), the northern section was further subdivided into six reaches (containing 17 cross sections), and the southern section into seven reaches (containing 18 cross sections). Detailed maps for each section and reach were produced in ArcGIS.

Morphological Change Analysis: Bankline and channel adjustments were assessed using multi temporal satellite imagery and field verification. To quantify planform change, the left and right banks of each reach were delineated for each study year. Superimposing these banklines allowed calculation of the displaced area, from which rates of erosion and accretion per reach were derived using the River Network Change

Index (RNCI). A positive RNCI value indicates net erosion dominance, while a negative value indicates net sedimentation.

Channel dynamics were analyzed by digitizing the channel centerline for each reach and year. Aggregating these centerline shifts yielded the total area of channel displacement, providing a measure of interannual channel mobility.

All quantitative data were processed in Microsoft Excel to generate summary tables and graphs. Finally, spatiotemporal patterns of riverbank change and channel dynamics were compared between the northern and southern sections across the study period, and an integrated analysis of channel variation was conducted.

Results and Discussion

Analysis of channel dynamics across four distinct time periods in the first study section revealed the intervals with the highest rates of change. These were interval 5 in the first period (2006–2017), interval 2 in the second (2017–2019), interval 2 in the third (2019–2025), and interval 6 in the composite fourth period (2006–2025). The highest average rate of change for this section occurred during the second time period, at 2.82 m per year. In the second study section, the highest centerline dynamics were observed in interval 1 of the first period, interval 4 of the second, interval 7 of the third, and interval 7 of the fourth period. Here, the highest average dynamics also occurred during the second time period, at 2.92 m per year.

An assessment of river planform changes in the first section showed that the right and left banks were entirely compact in type during the first, second, and fourth time periods. In contrast, all banks were erosive in type during the third period. The greatest average periodic changes in this section were recorded during the second time period, measuring 1.38 m on the right bank and 5.46 m on the left bank. For the second study section, bank types varied temporally: in the first period, right banks were compact while left banks were erosive; in the second and fourth periods, all banks were compact; and in the third period, all banks were erosive. The highest average periodic changes in this section also occurred during the second time period, reaching 2.24 m on the right bank and 5.09 m on the left bank.

In the first study section, multi-temporal imagery and field observations over the 20-year study period (2006–2025) revealed extensive and significant changes in the river reaches. Prior to major flood events, these reaches experienced erosion accompanied by a notable reduction in channel width. Following flood events, however, a sudden increase in sediment supply and the presence of highly erodible banks triggered substantial lateral expansion in addition to continued bed erosion. A comparative temporal analysis indicated that the six examined reaches underwent not only bed erosion but also a reduction in channel width of up to ten meters.

In the second section, the river exhibited different behavioral patterns. Before major floods, reaches experienced only minor erosion with negligible widening. In the post-flood period, a combination of increased sediment supply, removal and thinning of riparian vegetation, and bed erosion led to significant channel expansion. Temporal comparison showed that the seven studied reaches in this section were subject to both bed erosion and a cumulative channel widening of eight meters.

Conclusion

Although channel banks particularly in alluvial rivers are rarely stable and naturally fluctuate over time due to compaction and erosion, the magnitude of change observed in the study reaches during the investigation period suggests an unnatural river condition. Lateral channel migration is a critical process that sustains river ecosystems and forms an integral part of natural river dynamics; the deviations observed here, however, imply potential anthropogenic influences or altered hydrological regimes.

Given the high land value in this mountainous region, flooding can lead to the loss of agricultural land and damage to infrastructure and residential areas. In addition to affecting agriculture and rural settlements along both river sections, the extent of this vulnerability is significantly greater and more severe in the northern section than in the southern part of the study area. This disparity is largely attributable to the downstream location of the city of Khorramabad. Therefore, to enable more effective and efficient river management in this section, it is essential to identify and regulate areas prone to severe channel adjustment.

جلد ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، ص ۶۵-۴۳ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.93699.1573 دسترسی آزاد

جابه‌جایی کانال و فرسایش کناره‌ای در رودخانهٔ خرم‌رود طی بازه زمانی ۲۰۲۵-۲۰۰۶

محمد مهدی حسین زاده [۱]، شهرام امیری [۲*]

[۱] دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

[۲] دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱

کلمات کلیدی:

پویایی مورفولوژیک کانال

تغییرات پلان‌رود رودخانه

فرسایش کناری رودخانه

جابه‌جایی جانبی کانال

رودخانهٔ خرم رود

چکیده

رودخانه خرم رود طی چند دهه گذشته تحت تاثیر سطوح مختلفی از تغییرات مورفولوژیک با پیامدهای گوناگونی قرار گرفته است. از این رو این تحقیق با هدف بررسی و تحلیل روندهای تکاملی، تجزیه و تحلیل تغییرات ایجاد شده و در نهایت شناسایی ارتباط بین این روندها و عوامل کنترل کننده آنها در چهار بازه زمانی از سال ۲۰۲۵-۲۰۰۶ در راستای مدیریت رودخانه و کاهش اثرات منفی آن در دو بخش، بخش اول به طول ۱۶۷۰۰ متر در به ۶ بازه (۱۷ مقطع) و بخش دوم به طول ۱۷۲۱۲ متر در ۷ بازه (۱۸ مقطع) مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور با استفاده از داده‌های هیدرومتری دو ایستگاه بهرام جو(بخش اول) و چم انجیر(بخش دوم)، نقشه‌های توپوگرافی، تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث، مشاهدات و برداشت‌های میدانی در این بخش‌ها، پویایی کانال و تغییرات پلانفرم مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد بیشترین میزان میانگین تغییرات دوره‌ای در خط مرکزی و جابجایی کانال در هر دو بخش در بازه زمانی دوم (۲۰۱۷-۲۰۱۹) رخ داده است. نتایج بدست آمده در بخش اول در طی دوره زمانی ۲۰۲۵-۲۰۰۶ نشان داد که عرض کانال در این بخش کاهش یافته و رودخانه دچار فروسایی شده است و در بخش دوم نشان داد علاوه بر فروسایی، فرسایش کرانه‌ها با تشکیل دشت‌های سیلابی و در پی آن گسترش عرض رودخانه را باعث شده است. نتایج مقایسه بخش‌ها با همدیگر نشان داد که میزان آسیب پذیری به زمین‌های کشاورزی و نقاط مسکونی روستایی در طول هر دو بخش از رودخانه وجود دارد. اما میزان آسیب پذیری در بخش اول به علت قرار داشتن شهر خرم آباد در پایین دست آن به مراتب خیلی بیشتر و تاثیرگذارتر از بخش جنوبی منطقه مورد مطالعه است.

* نویسندهٔ مسئول: شهرام امیری

Email: s.amiri2010@yahoo.com

مقدمه

بهره‌برداری از منابع محیطی مستلزم نگاهی آگاهانه و حفاظت شده است که بتواند هم‌زمان با بهره‌برداری از این منابع، توسعه و پایداری لازم را نیز به دنبال داشته باشد. در طول قرن‌های گذشته و به‌ویژه در نیمه دوم قرن بیستم، بسیاری از سیستم‌های رودخانه‌ای به‌طور چشمگیری تحت تأثیر تغییرات اساسی هم در سطح حوضه و هم در داخل کانال قرار گرفته‌اند (Magliulo et al., 2021). رودخانه‌های آبرفتی از عناصر پویای چشم اندازها به‌شمار می‌آیند، آنها در پاسخ به تغییرات جریان و رسوب، پوشش گیاهی و شرایط اقلیمی واکنش‌های مختلفی نشان می‌دهند. اساساً دینامیک کانال، اکوسیستم‌های رودخانه‌ای و دشت سیلابی را شکل می‌دهند. کانال‌ها در نتیجهٔ فرسایش پیشرونده کرانه، فرسایش و رسوب‌گذاری بستر جابه‌جا می‌شوند (Konrad et al., 2011). بررسی جزئیات روند تکاملی رودخانه‌ها در بازه‌های زمانی طولانی‌تر جهت ارزیابی بزرگی فرآیندها، شناسایی روندها و شناسایی علل تغییرات کانال بسیار مهم است. زیرا درک بهتر و علمی آنها، برای تفسیر شرایط فعلی کانال یک موضوع حیاتی می‌باشد. تغییرات پلانفرم کانال به دلیل ناپایداری‌های عمودی و جانبی (برش و عریض شدگی) در این گونه از رودخانه‌ها که از پیامدهای فعالیت‌های انسانی (شدیدتر) و طبیعی می‌باشد، باعث ایجاد مشکلات متعددی هم برای مدیران و هم سایر جمعیت‌های بهره‌بردار شده است (Surian et al., 2009). این امر در رودخانه‌های واقع در مناطق پرجمعیت، به‌ویژه در مناطق کوهستانی می‌تواند منجر به از دست دادن زمین‌های کشاورزی، آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها و ساختمان‌های مجاور آن شود. از این رو همواره در بحث‌های مدیریتی به عنوان یک مسئلهٔ چالش برانگیز در نظر گرفته می‌شود. در واقع اثرات فرایندهای ژئومورفیک رودخانه‌های کوهستانی می‌تواند از طغیان‌های آنها مهم‌تر باشد (Ruiz-Villanova et al., 2023). رودخانه‌های واقع در این مناطق به دلیل سطح بسیار بالای فشارهای انسانی و طبیعی و متعاقب آن تغییرکانال باعث مشکلات متعددی برای مهندسان، مدیران و جمعیت‌های انسانی وابسته به این جریان‌ها شده است. در عین حال، خطرات مربوط به فرایندهای رودخانه‌ای و پویایی کانال به دلیل درجهٔ بالای شهرنشینی در این قلمروها نگرانی‌های زیادی را به‌دنبال دارند (Comiti, Lucia & Rickenmann, 2016).

این تغییرات همواره از دیرباز برای بسیاری از کشورها باعث ایجاد مشکلات متعددی هم برای مدیران و هم سایر جمعیت‌های بهره‌بردار شده است. جهت رفع این مشکلات، پژوهشگران زیادی در چند دههٔ گذشته با استفاده از روش‌های گوناگون به بررسی روندها و تغییرات بلندمدت مورفولوژی کانال رودخانه‌ها (در مقیاس‌های دهه و صد ساله) پرداخته‌اند. مگدلنو و فرناندز (Magdaleno & Fernandez, 2011b) جابه‌جایی پیچان‌رودها و تغییرات جانبی رودخانه ابرو را در اسپانیا بررسی کردند. آنها این کار را با بررسی عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای در ۲۵۰ کیلومتر از مسیر رودخانه در طی سال‌های ۱۹۵۶،۱۹۲۷ و ۲۰۰۳ انجام دادند. بررسی آنها تغییرات وسیعی را در فعالیت پیچان‌رودها و کنارهٔ رودخانه اِبرو نشان داده است. مگلیلو و همکاران (Magliulo, Bozzi & Pignone, 2016) در پژوهشی با عنوان ارزیابی تغییرات پلان رودخانه تامارو (جنوب ایتالیا) از سال ۱۸۷۰ تا ۱۹۵۵ با استفاده از تحلیل نقشهٔ تاریخی به این نتیجه دست یافتن که علت اصلی تغییرات فعالیت‌های انسانی می‌باشد. علی و همکاران (Ali et al., 2019) در سال ۲۰۱۹ ویژگی‌های جابه‌جایی کانال رودخانه یامونا را از سال ۱۹۵۴ تا ۲۰۱۵ در مجاورت آگرا مورد بررسی قرار داده‌اند. با کاهش میزان دبی رودخانه در چند دههٔ اخیر ظرفیت فرسایشی رودخانه و رفتار جابه‌جایی متعاقب آن کاهش یافته است. شاخص‌های سینوسیتی نشان می‌دهند که طول رودخانه بعد از سال ۱۹۵۴ هم افزایش و هم کاهش یافته است. آنایات و سیل (Annayat & Sil, 2020) تغییرات در پارامترهای پیچان‌رودی و پیش‌بینی جابه‌جایی کانال در قسمت آبرفتی رودخانه باراکا را با استفاده از تصاویر سنجش از دور، تحقیقات میدانی از بستر کانال و ویژگی‌های کرانه‌ها و پوشش گیاهی کرانه بررسی کردند. مگلیلو و همکاران (Magliulo et al., 2021)

در پژوهشی با عنوان تغییرات کانال در بازۀ زمانی بیش از ۱۴۰ سال در پاسخ به سیلاب‌های شدید و تغییر کاربری زمین، رودخانه تامارو در جنوب ایتالیا را با استفاده از تجزیه و تحلیل ژئومورفولوژیکی و کاربری زمین مبتنی بر GIS، بررسی‌های میدانی و تجزیه و تحلیل داده‌های هیدرولوژیکی (بارندگی، دبی جریان، سیل‌های شدید) مطالعه کردند و دریافتند که کانال با توجه به تغییرات ایجاده شده واکنش‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهد. گارسیا مارتینز و رینالدی (García-Martínez & Rinaldi, 2022) در مطالعۀ تغییرات کانال در پایین رود گوادالکیویر (جنوب اسپانیا) در ۲۵۰ سال گذشته از سال ۱۷۵۰تا۲۰۱۰ را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که بیشترین تغییرات ایجاد شده در طی صد سال گذشته و در نتیجه احداث سدها بوده است. عظیم (Azim, 2024) تغییرات هیدرومورفولوژیک را در رودخانۀ نیل در بازۀ زمانی ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۳ از طریق داده‌های عمق‌سنجی و هیدرولوژیک مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد که در طی ۲۱ سال رودخانه در بازۀ مورد مطالعه فروسایی داشته و آسیب پذیری کرانه افزایش یافته است. کین و همکاران (Qin, Jin, Du & Jin, 2024) تغییرات مورفولوژی رودخانه و عوامل تأثیرگذار را در رودخانه یللو در طی ۲۵ سال اخیر مورد مطالعه قرار داده‌اند. تغییرات مکانی - زمانی در مورفولوژی رودخانه در UYR با استفاده از پارامترهای مورفولوژی رودخانه (مانند مساحت، عرض کانال، طول خط مرکزی، شاخص سینوسی، نرخ مهاجرت جانبی و پایداری کانال) نشان داد که مساحت و میانگین عرض کل محدوده UYR به طور قابل توجهی تغییر کرده است، به طوری که حداکثر مقدار ۱/۳ برابر حداقل مقدار بوده است، در حالی که طول خط مرکزی و شاخص سینوسی هیچ تغییر ظاهری نشان نداده‌اند و نرخ مهاجرت جانبی حداقل تغییر کرده است.

یمانی و گورابی (Yamani & Goorabi, 2015) در پژوهشی با عنوان پیش‌بینی تغییرات هندسی رودخانه کردان در محدوده طی سالهای ۱۳۳۴ تا ۱۳۷۸ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که میزان تغییرات جانبی رودخانه در محدوه مذکور در قسمت‌های مختلف بین۳۷ تا ۱۶۵ متر متغیر بوده است و با توجه به همین نتایج نسبت به پیش‌بینی ۲۰ سال آینده انجام داده‌اند. حسین‌زاده و همکاران (Hosseinzadeh, Rashidi, Sepehr, Zarei & Khaneh Bad, 2018) در تحقیقی به بررسی علل ایجاد و تغییرات جزایر در طی سال‌های ۱۹۵۴تا ۲۰۱۱ در رودخانه کارون پرداختند. در این تحقیق از داده‌های ماهواره‌ای لندست و IRS استفاده نموده‌اند و به این نتیجه رسیدند که رودخانه کارون دچار تغییرات چشمگیری در مورفولوژی شده است، همچنین عرض بستر رودخانه در محدودۀ شهری اهواز کاهش شدیدی داشته است. حسین‌زاده و همکاران (Hosseinzadeh, Esmaeili & Nabizadeh, 2022) در پژوهشی با عنوان تحلیل تغییرات زمانی و پایداری پلانفرم آبراهه رود نکا – مازندران، در سه مقطع زمانی بین سال‌های ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۹ و با استفاده از روش ترانسکت، سه شاخص مورفومتری، مورفولوژی و مورفودینامیک، تغییرات مسیر این رودخانه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از بررسی آنها نشان می‌دهد که مقادیر ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی و زوایای قوس‌ها در طول رودخانه از بالادست به طرف پایین دست کاهش یافته است. صفاری و همکاران (Saffari, Ghanavati & Alipour, 2023) در پژوهشی با عنوان بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانه کارون و مخاطرات ناشی از آن با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بین سال‌های ۱۹۹۰تا ۲۰۱۸ تغییرات مورفولوژی این رودخانه را استخراج کردند. در بین عوامل مؤثر مورد بررسی، تغییرات کاربری، تراکم پوشش گیاهی و رسوب بیشترین اثرگذاری را بر تغییرات ایجاد شده عنوان کرده‌اند. عابدینی و همکاران (Abedini, Fateh Elahi & NezafatTakle, 2024) پژوهشی با عنوان بررسی فرسایش کناری رودخانۀ دره رود شهرستان هوارند آذربایجان با استفاده از مدل راسکن به این نتیجه رسیدند که بیشتر بازه‌های مورد بررسی در وضعیت ضعیف و ناپایدار قرار دارند و تنها دو بازه در وضعیت مناسبی قرار دارند. نتایج آنها نشان داد که طبقه‌بندی رودخانه در این منطقه با استفاده از این مدل، ارزیابی دقیقی را برای کاربردهای مدیریتی فراهم می‌کند.

حسین‌زاده و همکاران (Hosseinzadeh, Salehi Milani & Hydari, 2024) در پژوهشی با عنوان تغییرات ژئومورفیک رودخانهٔ چشمه کیله در محدودهٔ جلگهٔ ساحلی غرب مازندران تغییرات کانال را در این رودخانه به طول ۸۰ کیلومتر در حدفاصل عباس آباد تا رامسر از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داده است که میزان تغییرات کرانه در الگوی سینوسی بیشتر از الگوی مستقیم بوده است و بازه‌های واقع در بخش میانی و بالایی جلگه به دلیل شیب بیشتر شرایط مناسب‌تری جهت فرسایش کرانه و ناپایداری کانال را داشته‌اند. رحیمی و همکاران (Rahimi, Khaleghi & Salehipour Milani, 2024) ارزیابی تغییرات مورفولوژیکی رودخانهٔ سدیج در اثر رخداد سیلاب‌ها در یک دورهٔ ۱۱ ساله در قاعدهٔ دلتای سدیج را با استفاده از مدل شاخص تغییر شبکهٔ رودخانه (RNCI) مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که سیلاب سال ۱۳۹۷ نسبت به دیگر سیلاب‌ها، تأثیرات زیادتری بر تغییرات ژئومورفولوژیکی عرض کانال و فرسایش شدید کرانهٔ رودخانه داشته است. اسماعیلی و نوری‌زاده (Esmaili & Nourizadeh Nesheli, 2024) ارزیابی تغییرات مورفولوژیکی رودخانه هراز در اثر فشارهای انسانی در محدودهٔ شهر آمل را طی یک دورهٔ ۵۳ ساله (۱۳۴۷-۱۴۰۰) مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج نشان داد که با تنگ شدگی رود و کاهش شدید موانع طولی، پلانفرم رودخانه از حالت شریانی به تک کانالی تغییر یافت. کاهش جریان پایه رود و کانال‌های آبیاری، تصرف دشت سیلابی و تغییر کاربری اراضی حاشیه رود از مهم‌ترین عوامل فشار در تغییرات مورفولوژیکی رود در محدودهٔ مورد مطالعه بوده‌اند.

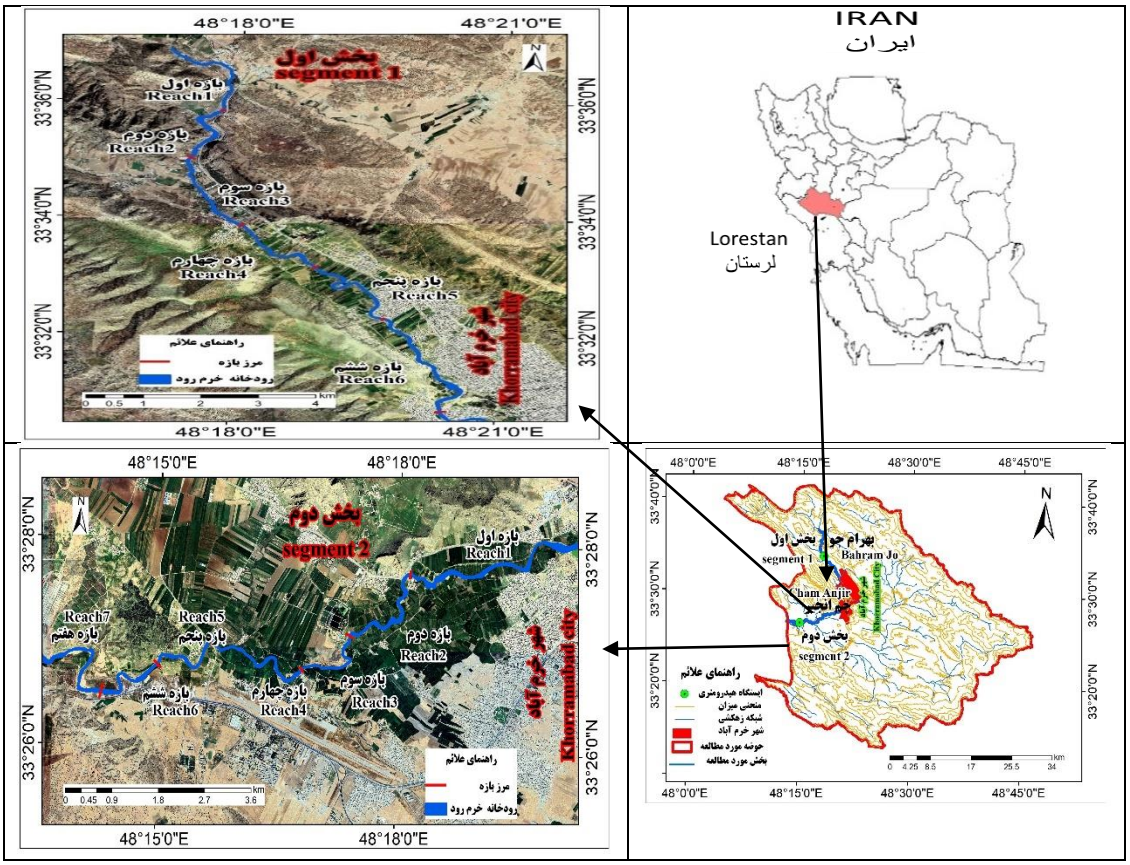
جمع‌بندی نتایج پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که رودخانه‌ها روندهای مشابهی از تغییرات کانال را تجربه کرده‌اند که از پیامدهای تغییر کاربری زمین در سطح حوضه و دشت سیلابی، تغییر جریان و استخراج رسوب می‌باشد. رودخانهٔ خرم‌رود طی چند دههٔ گذشته تحت تأثیر سطوح مختلفی از تغییرات مورفولوژیک با پیامدهای گوناگونی قرار گرفته است و تاکنون مطالعه جامعی در رابطه با میزان تغییرات ایجاد شده در آن انجام نشده است. از این رو هدف این تحقیق، بررسی و تحلیل روندهای تکاملی، میزان تغییرات ایجاد شده و در نهایت شناسایی ارتباط بین این روندها و عوامل کنترل کنندهٔ آن در بازه‌های زمانی ۲۰۲۵ - ۲۰۰۶ در راستای مدیریت رودخانه و کاهش اثرات منفی آن می‌باشد. روش کار مورد استفاده در این پژوهش در سال‌های اخیر در کشورهای مختلف جهت احیاء و مدیریت رودخانه‌ها به کار گرفته شده، برای بررسی تغییرات مورفولوژی رودخانهٔ خرم‌رود انجام شده است. تحلیل تغییرات رودخانهٔ خرم‌رود در طول دهه‌های گذشته (نبود مطالعات مرتبط با مورفولوژی رودخانهٔ خرم‌رود) می‌تواند شناخت ما را نسبت به فرآیندهای حاکم بر رودخانه ارتقاء دهد؛ همچنین نتایج به‌دست آمده از این پژوهش می‌تواند توسط مدیران و تصمیم گیرندگان در راستای احیاء و مدیریت رودخانه خرم‌رود مورد استفاده قرار گیرد.

منطقهٔ مورد مطالعه

منطقهٔ مورد مطالعه بخشی از رودخانهٔ خرم‌رود به طول حدود ۳۴ کیلومتر، شامل دو بخش در قسمت شمالی (بازه ۱ تا ۷) و بخش جنوبی (بازه ۸ تا ۱۳) شهر خرم‌آباد و در طول جغرافیایی ′۰۸ °۴۸ تا ′۲۱ °۴۹ شرقی و عرض جغرافیایی ′۱۳ °۳۳ تا ′۳۴ °۳۳ شمالی واقع شده است. بخش اول که به موازات جادهٔ خرم‌آباد - کرمانشاه از روستای دارحوض تا پل شهدای فلک‌الدین و به طول ۱۶۷۰۰ متر است. این بازه از نظر توپوگرافی، در ارتفاعی بین ۱۳۳۰ متر تا ۱۴۱۰ متر و متوسط شیب ۰/۴۷ درصد قرار دارد. بخش دوم از پل یادگار امام (انتهای شهر) تا پل مجتمع کشت صنعت به طول ۱۷۲۵۰ متر می‌باشد. این بخش از نظر توپوگرافی، در ارتفاعی بین ۱۲۱۰متر تا ۱۲۷۰ متر و متوسط شیب۰/۳۴درصد قرار دارد. میانگین دبی آن در دورهٔ آماری (۲۰۰۴- ۲۰۲۴) در ایستگاه بهرام‌جو ۲/۰۲ m^3/s و میانگین حداکثر ۶/۶۹ m^3/s می‌باشد. در ایستگاه چم انجیر نیز میانگین دبی در دوره آماری ۷/۸۷ m^3/s و میانگین حداکثر ۲۶/۷۶ m^3/s می‌باشد.

از نظر زمین‌شناسی این منطقه در ناحیهٔ لرستان از کمربند چین خورده – رانده زاگرس و در شمال‌غرب فروافتادگی دزفول قرار دارد. از نظر ساختاری تناوبی از تاقدیس‌ها و ناودیس‌های کوچک و بزرگ دیده می‌شود. قدیمی‌ترین سازند برونزده در هستهٔ تاقدیس خرم‌آباد، سازند گرو می‌باشد. روی این سازند سنگ‌های کربناته سازند سروک با سن کرتاسه و سپس سازندهای جوان‌تر به ترتیب ایلام، امیران، کشکان، آسماری، آغاجاری و نهشته های کواترنری قرار گرفته‌اند.

رودخانه در حوضه مورد مطالعه هر سه مرحله جوانی، بلوغ و پیری را نشان می‌دهد. در بخش اول از حد فاصل روستای رباط نمکی تا تنگ شبیخون دره به صورت v شکل و با شیب نسبتاً زیاد است (مرحله جوانی) در حد فاصل تنگ شبیخون تا جنوب شهر خرم‌آباد نیمرخ دره U شکل (مرحله بلوغ) و در بخش دوم رودخانه در حدفاصل جنوب شهر خرم‌آباد تا جنوبی‌ترین نقطه از محدودهٔ مورد مطالعه در پایاب، رودخانه مسیر دشت خرم‌آباد را طی می‌کند. رودخانه در این قسمت قوس‌های بزرگی دارد که نشان می‌دهد رودخانه در این قسمت در مرحلهٔ پیری دورهٔ تکامل خود قرار دارد. متوسط بارندگی سالیانهٔ ایستگاه هواشناسی خرم‌آباد ۵۱۷ میلیمتر و متوسط دمای سالیانه آن ۱۶/۸ درجه سانتی‌گراد است که بر اساس این آمار و شاخص آب و هوایی دمارتن می‌توان نوع اقلیم به‌دست آمده برای منطقهٔ خرم‌آباد را نیمه خشک یا مدیترانه‌ای قلمداد کرد (Arian Tabar, Jabbari & Farahpour, 2021) (شکل ۱).



شکل۱– موقعیت منطقهٔ مورد مطالعهٔ خرم‌رود ، استان لرستان ، ایران

Fig.1. Location of the study area: Khoramroud, Lorestan Province, Iran

مواد و روش‌ها

جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات به منظور بررسی تغییرات مورفولوژیک رودخانهٔ خرم‌رود، با استفاده از ابزارهای فیزیکی مانند نقشه‌های توپوگرافی (۱:۲۵۰۰۰) شیت‌های ۵۶۵۶۱NW، ۵۶۵۶۴NE و۵۶۵۷۲SW، نقشهٔ زمین‌شناسی خرم‌آباد (۱:۲۵۰۰۰۰)، تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث و مشاهدات و برداشت‌های میدانی در بهمن ماه ۱۴۰۳ و اردیبهشت ماه ۱۴۰۴ انجام شد. بر پایه برداشت‌های میدانی پارامترهای مورفومتری کانال شامل عرض و عمق مقطع، سرعت جریان، نوع پوشش گیاهی کرانه، بافت رسوبات بستر و کرانه، حد دبی لبالبی و ویژگی‌های کانال و دخالت‌های انسانی ثبت و به‌دست آمد. با بررسی آمار داده‌های ایستگاه هیدرومتری بهرام‌جو و چم انجیر (سال‌هایی که دارای دبی بالاتری بودن که قابلیت ایجاد تغییرات در کانال را داشتند) و کیفیت تصاویر ماهواره‌ای موجود در محیط گوگل ارث از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۵، سال‌های ۲۰۰۶ ، ۲۰۱۷ ، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۵ انتخاب شدند و نقشه‌های مورد نیاز در محیط نرم‌افزار Arc GIS ترسیم و رقومی‌سازی شد. با توجه به طول رودخانه خرم‌رود (۳۴ کیلومتر) و قرارگیری شهر خرم‌آباد در بخش میانی منطقهٔ مورد مطالعه، محدودهٔ مورد بررسی به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم‌بندی شد. جهت بررسی دقیق‌تر طبق روش رینالدی و همکاران (Rinaldi et al., 2012)، بخش اول به شش بازه (۱۷ مقطع) و بخش دوم به هفت بازه (۱۸ مقطع) بر اساس تغییرات الگو، شیب، موقعیت کانال و سازه‌های احداث شده بازه‌بندی شد. به‌منظور بررسی تغییرات پلانفرم کانال، ابتدا کناره‌های راست و چپ هر کدام از بازه‌های رودخانه در سال‌های مختلف ترسیم و سپس با روی هم گذاری آنها مساحت جابجا شده محاسبه شد و با استفاده از شاخص تغییر شبکه رودخانه (RNCI[1])، فرسایشی و تراکمی بودن هر کدام از بازه‌ها مشخص شد. مقدار مثبت RNCI نشان دهندهٔ غلبهٔ فرسایش است در حالی‌که مقدار منفی آن فرآیند رسوب‌گذاری در امتداد کرانهٔ رودخانه را نشان می‌دهد. با استفاده از این شاخص و بر اساس کانال فعال رودخانه، منطقهٔ فرسایشی و منطقهٔ رسوب‌گذاری طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Ghosh et al., 2023).

$$RNCI = (\frac{\sum EA - \sum DA}{L})/T \quad (۱)$$

که در آن EA منطقهٔ فرسایشی، DA منطقهٔ رسوبی، L طول بازه و T دورهٔ مورد مطالعه است.

به منظور بررسی پویایی کانال (CA[2])، خط مرکزی کانال در بخش‌ها و بازه‌های مختلف و برای دوره‌های زمانی مورد بررسی برای هر یک از سال‌های مورد مطالعه ترسیم گردید و سپس با روی هم‌گذاری آنها مساحت جابه‌جا شده کانال محاسبه و با استفاده از رابطه (۲) (Magdaleno & Fernandez, 2011a) میزان تغییرات در سال‌های مختلف محاسبه شد.

$$CA = (\frac{SA}{Lt1})/T2 - T1 \quad (۲)$$

CA: میزان فعالیت کانال، SA: مساحت جابه‌جا شده در طی دو زمان، Lt1: طول کانال در زمان اول، T1: زمان اول (سال اول)، T2: زمان (سال دوم).

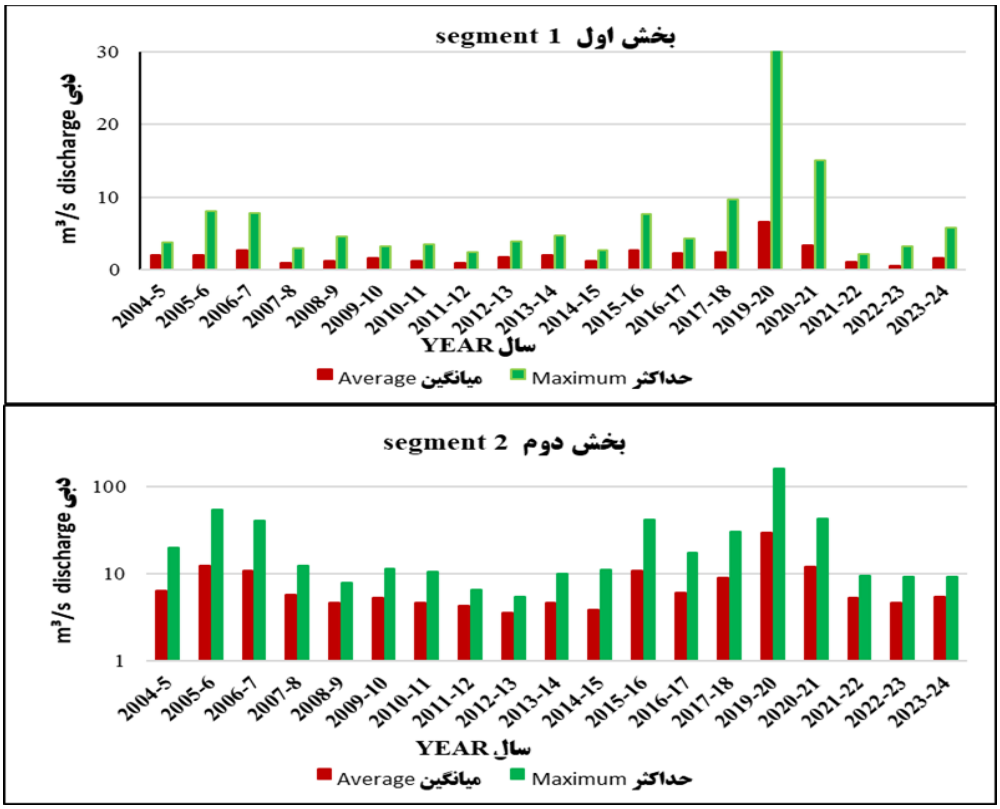
در ادامه اطلاعات و داده‌ها به نرم افزار EXCEL منتقل و جداول و نمودارها آنها ترسیم شدند و در نهایت تغییرات کناره‌های رودخانه و پویایی کانال در هر دو بخش در سال‌های مورد مطالعه مورد مقایسه و تغییرات آنها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

1- River network change index
2 - Channel activity

نتایج و بحث

منطقهٔ مورد مطالعه دارای دو ایستگاه هیدرومتری بهرام‌جو (بخش اول) و چم انجیر (بخش دوم) می‌باشد. میانگین دبی در دوره آماری (۲۰۰۴- ۲۰۲۴) در ایستگاه بهرام‌جو ۲/۰۲ m³/s و میانگین حداکثر ۶/۶۹ m³/s می‌باشد. در ایستگاه چم انجیر نیز میانگین دبی در دوره آماری ۷/۸۷ m³/s و میانگین حداکثر ۲۶/۷۶ m³/s می‌باشد.

حداکثر دبی مشاهده شده در ایستگاه بهرام‌جو(۳۰/۹۳ m³/s) و چم انجیر (۱۵۸/۶۷ m³/s) در سال ۲۰۱۹ ثبت شده است (شکل ۲).

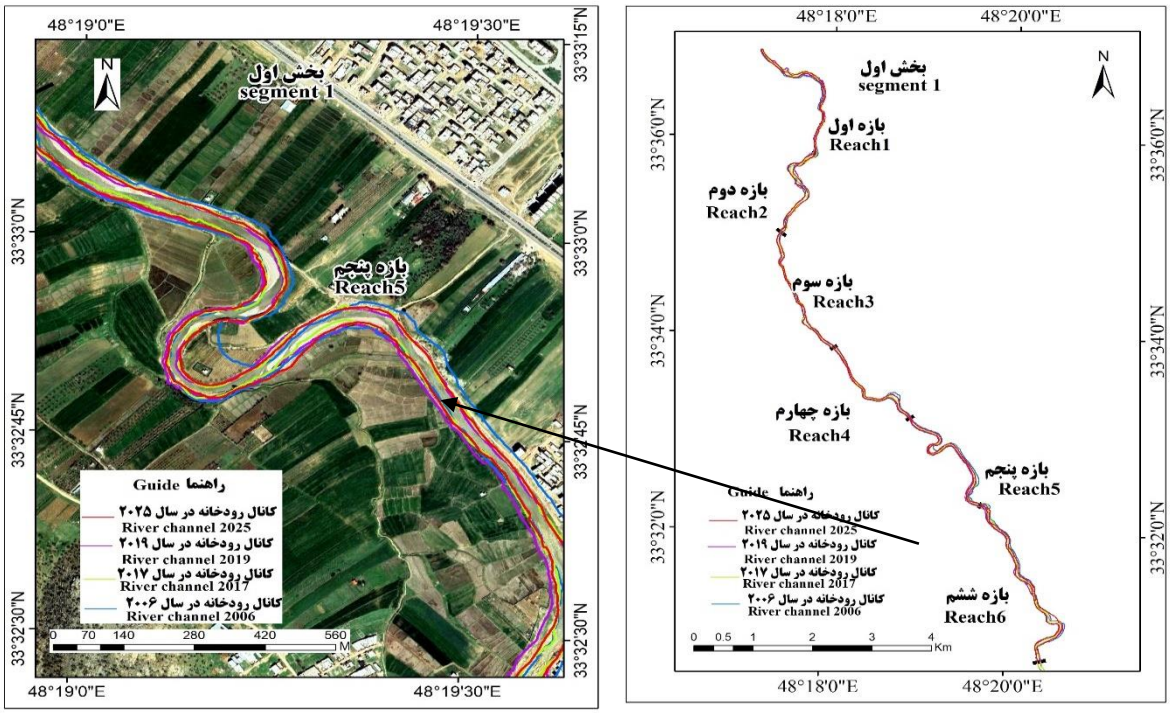


شکل۲ – میانگین و حداکثر دبی در دو ایستگاه هیدرومتری بهرام‌جو (بخش اول) و چم انجیر (بخش دوم)

Fig.2. Mean and maximum discharge at the two hydrometric stations: Bahram Jo (segment 1) and Cham Anjir (segment 2)

نتایج پویایی کانال در بخش اول: نتایج به‌دست آمده در چهار دورهٔ زمانی مورد مطالعه در بخش اول، نشان داد که در دورهٔ زمانی اول (۲۰۱۷-۲۰۰۶) بازه‌های ۵ و ۳ (۱/۰۵ و۰/۴۴ متر در سال)، در دورهٔ زمانی دوم (۲۰۱۷-۲۰۱۹) بازه‌های ۲ و ۳ (۳/۹۴ و۱/۱۸ متر در سال)، در دورهٔ زمانی سوم (۲۰۱۹-۲۰۲۵) بازه‌های ۲ و ۳ (۳/۹۴ و ۱/۱۸ متر در سال) و در دورهٔ زمانی چهارم (۲۰۲۵-۲۰۰۶) بازه‌های ۶ و ۴ (۰/۶۵ و۰/۲۴ متر در سال) به‌ترتیب بیشترین و کمترین میزان پویایی کانال را داشته‌اند. بیشترین میانگین تغییرات کل بخش اول در بازه زمانی دوم (۲/۸۲ متر در سال) رخ داده است (جدول۱ و شکل ۳).

نتایج پویایی کانال در بخش دوم: نتایج به‌دست آمده در چهار بازهٔ زمانی مورد مطالعه در بخش دوم، نشان داد که در دورهٔ زمانی اول بازه‌های ۱ و ۳ (۱/۰۷ و۰/۲۰ متر در سال)، در دورهٔ زمانی دوم، بازه‌های ۴ و ۳ (۳/۹۷ و۱/۷۹ متر در سال)، در دورهٔ زمانی سوم بازه‌های ۷ و ۳ (۳/۴۶ و۰/۶۲ متر در سال) و در زمانی چهارم بازه‌های ۷ و ۳ (۱/۰۸ و۰/۱۳ متر در سال) به‌ترتیب بیشترین و کمترین میزان تغییرات خط مرکزی را داشته‌اند. بیشترین میانگین پویایی در بازه زمانی دوم (۲/۹۲ متر در سال) رخ داده است (جدول۲ شکل ۴).



شکل۳- پویایی کانال در دوره‌های زمانی مورد مطالعه در بازه‌های بخش اول

Fig.3. Channel dynamics in the initial channel reaches during the study periods

جدول۱ - میزان پویایی کانال در بازه‌های بخش اول در سال‌های مورد مطالعه (مقادیر بر حسب متر در سال)

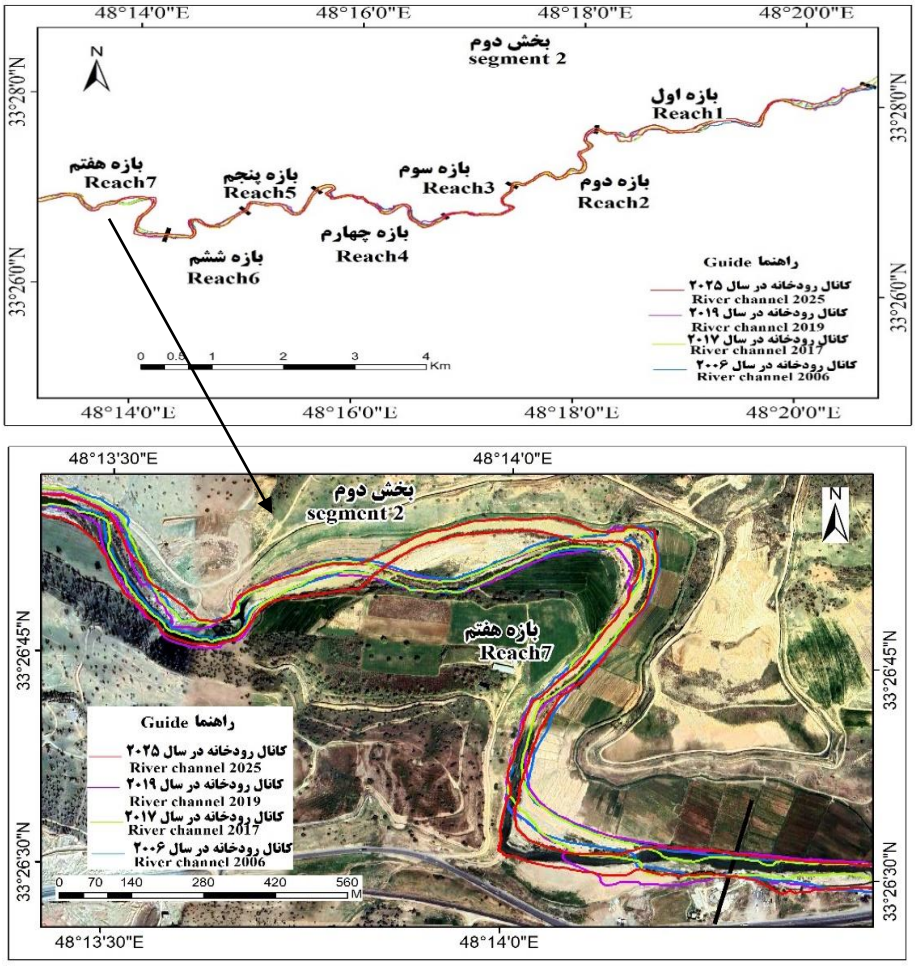
Table 1- Stream channel dynamics in the initial channel reaches during the study periods (m/y)

2006-2017	2017-2019	2019-2025	2006-2025	دوره زمانی Time period / بازه Reach
0.77	3.01	0.88	0.30	**1**
0.74	3.94	1.04	0.50	**2**
0.44	1.18	0.54	0.25	**3**
0.56	2.27	0.78	0.24	**4**
1.05	3.13	0.87	0.60	**5**
0.76	3.35	1.65	0.65	**6**
0.72	2.82	0.97	0.42	**میانگین پویایی Average CA**

جدول۲- میزان پویایی کانال در بازه‌های بخش دوم در سال‌های مورد مطالعه (مقادیر بر حسب متر در سال)

Table 2- Stream channel dynamics in the second channel reaches during the study periods (m/y)

2006-2017	2017-2019	2019-2025	2006-2025	دوره زمانی Time period / بازه Reach
1.07	3.6	1.16	0.9	**1**
0.22	2.4	1.01	0.34	**2**
020	1.79	0.62	0.13	**3**
0.70	3.97	1.30	0.44	**4**
0.34	2.22	0.57	0.25	**5**
0.64	3.63	0.89	0.45	**6**
0.41	3.01	3.46	1.08	**7**
0.51	2.95	1.29	0.51	**میانگین پویایی Average CA**



شکل۴ – پویایی کانال در دوره‌های زمانی مورد مطالعه در بازه‌های بخش دوم

Fig.4. Stream channel dynamics in the second channel reaches during the study periods (m/y)

نتایج تغییرات کرانه رودخانه در بازه‌های مورد مطالعه در بخش اول: نتایج به‌دست آمده با استفاده از شاخص تغییر شبکهٔ رودخانه در چهار بازهٔ زمانی مورد مطالعه در بخش اول (جدول ۳) نشان داد که در دورهٔ زمانی اول تمام کناره‌های راست بازه‌های این بخش از نوع تراکمی بوده و بازه ۱(۱/۶۷ – متر) بیشترین میزان رسوب‌گذاری را داشته است. درکناره‌های چپ، بازه‌های ۳ (۰/۲۹ متر فرسایش) و ۶ (۱/۷۳- متر رسوب‌گذاری) به ترتیب بیشترین میزان فرسایش و رسوب‌گذاری را داشته‌اند. در دورهٔ زمانی دوم همه کناره‌های راست بازه‌های این بخش از نوع فرسایشی بوده و بازه ۶ (۷/۴۰ متر) بیشترین میزان فرسایش را داشته است و در کناره‌های چپ، بازه‌های۴ (۳/۳۲ متر) و ۵ (۰/۳۱- متر) به ترتیب بیشترین میزان فرسایش و رسوب‌گذاری را داشته اند. در دورهٔ زمانی سوم تمام کناره‌های راست بازه‌های این بخش از نوع تراکمی بوده و بازه ۶ (۱/۲۸ – متر) بیشترین میزان رسوب‌گذاری را داشته است. درکناره‌های چپ، بازه‌های ۶ (۰/۵۳ متر) و ۱ (۱/۵۴- متر) به ترتیب بیشترین میزان فرسایش و رسوب‌گذاری را داشته‌اند. در دورهٔ زمانی چهارم درکناره‌های راست، بازه‌های ۲ (۰/۴۸ متر) و ۱ (۰/۷۵- متر) و درکناره‌های چپ، بازه‌های۳ (۰/۰۸ متر) و ۵ (۱/۰۷- متر) به ترتیب بیشترین میزان فرسایش و رسوب‌گذاری را داشته‌اند. بیشترین میزان میانگین تغییرات دوره‌ای در بازهٔ زمانی دوم به میزان ۱/۳۸ متر در کرانه راست و ۵/۴۶ متر در کرانه چپ رخ داده است (شکل۵ و۶).



شکل۵- الف) برش بستر رودخانه، ب) فرسایش حاشیه رودخانه در بخش اول

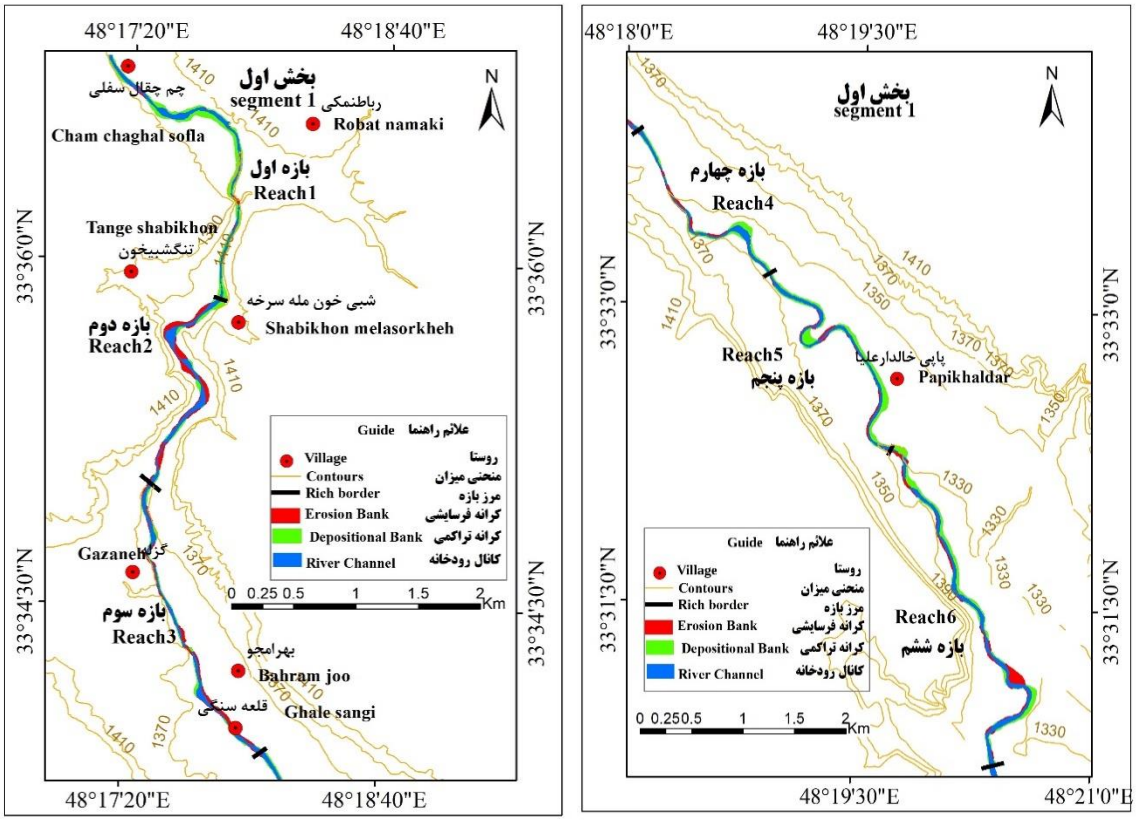
Fig.5. (a) Riverbed cross-section; (b) bank erosion in the initial reach

نتایج تغییرات کرانهٔ رودخانه در بازه‌های مورد مطالعه در بخش دوم: نتایج به‌دست آمده در چهار بازهٔ زمانی مورد مطالعه، در این بخش (جدول ۴) نشان داد که در دورهٔ زمانی اول در کناره‌های راست، بازه‌های ۱ (۰/۲۷ متر) و ۴ (۱/۱۶- متر) و در کناره‌های چپ، بازه‌های ۵ (۰/۱۴ متر) و ۱ (۰/۸۱- متر) به ترتیب بیشترین میزان فرسایش و رسوب‌گذاری را داشته‌اند. در دورهٔ زمانی دوم همه کناره‌های راست بازه‌های این بخش از نوع فرسایشی بوده و بازه ۴ (۹/۶۸ متر) بیشترین میزان فرسایش را داشته است و درکناره‌های چپ، بازه‌های ۷ (۴/۷۸متر) و ۵ (۰/۳۲- متر) به ترتیب بیشترین میزان فرسایش و رسوب‌گذاری را داشته‌اند. در دورهٔ زمانی سوم درکناره‌های راست، بازه‌های ۷ (۱/۴۹ متر) و ۴ (۲/۱۷- متر) و درکناره‌های چپ، بازه‌های ۱ و ۷ (۰/۷۷ متر) و ۶ (۱/۳۱- متر) به ترتیب بیشترین میزان فرسایش و رسوب‌گذاری را داشته‌اند. در دورهٔ زمانی چهارم درکناره‌های راست، بازه‌های۱ (۰/۸۰ متر) و ۴ (۰/۳۰- متر) و در کناره‌های چپ، بازه‌های۲ (۰/۴۴ متر) و ۱ (۰/۵۵- متر) به ترتیب بیشترین میزان فرسایش و رسوب‌گذاری را داشته‌اند. بیشترین میزان میانگین تغییرات دوره‌ای در بازه زمانی دوم به میزان ۲/۲۴ متر در کرانه راست و ۵/۰۹ متر در کرانه چپ رخ داده است (شکل۷و ۸).

جدول۳ – تغییرات پلان بازه‌ها در بخش اول بر اساس مساحت کانال در سال‌های مورد مطالعه (متر در سال)

Table 3- Planform changes of reaches in the initial reach based on channel area during the study years (m/y)

دوره زمانی Time period	2006-2025		2019-2025		2017-2019		2006-2017	
بازه reach	کرانه چپ Left Bank	کرانه راست Right Bank	کرانه چپ Left Bank	کرانه راست Right Bank	کرانه چپ Left Bank	کرانه راست Right Bank	کرانه چپ Left Bank	کرانه راست Right Bank
1	-0.4	-0.75	-1.54	-1.16	1.81	5.72	-0.18	-1.67
2	0.01	0.48	-1.16	-0.33	2.34	6.93	0.23	-0.28
3	0.08	0.02	-0.92	-0.40	1.91	3.16	0.29	-0.33
4	-0.4	-0.17	0.22	-1.17	3.32	3.31	-1.4	-0.39
5	-1.07	-0.03	-0.14	-1.24	-0.31	5.26	-1.72	-0.29
6	-0.65	0.16	0.53	-1.28	0.47	7.40	-1.73	-0.39
میانگین Average	-0.05	-0.45	-1	-0.42	5.46	1.38	-0.57	-0.86
RNCI	تراکمی depositional	تراکمی depositional	تراکمی depositional	تراکمی Depositional	فرسایشی erosion	فرسایشی erosion	تراکمی depositional	تراکمی depositional



شکل۶ – تغییرات پلان رود از نظر شرایط تراکمی و فرسایشی بودن در بازه‌های مورد مطالعه در بخش اول

Fig.6. Planform changes of the river in terms of depositional and erosional conditions in the studied reaches of the initial reach

جدول۴ – تغییرات پلان بازه‌ها در بخش دوم بر اساس مساحت کانال در سال‌های مورد مطالعه (متر در سال)

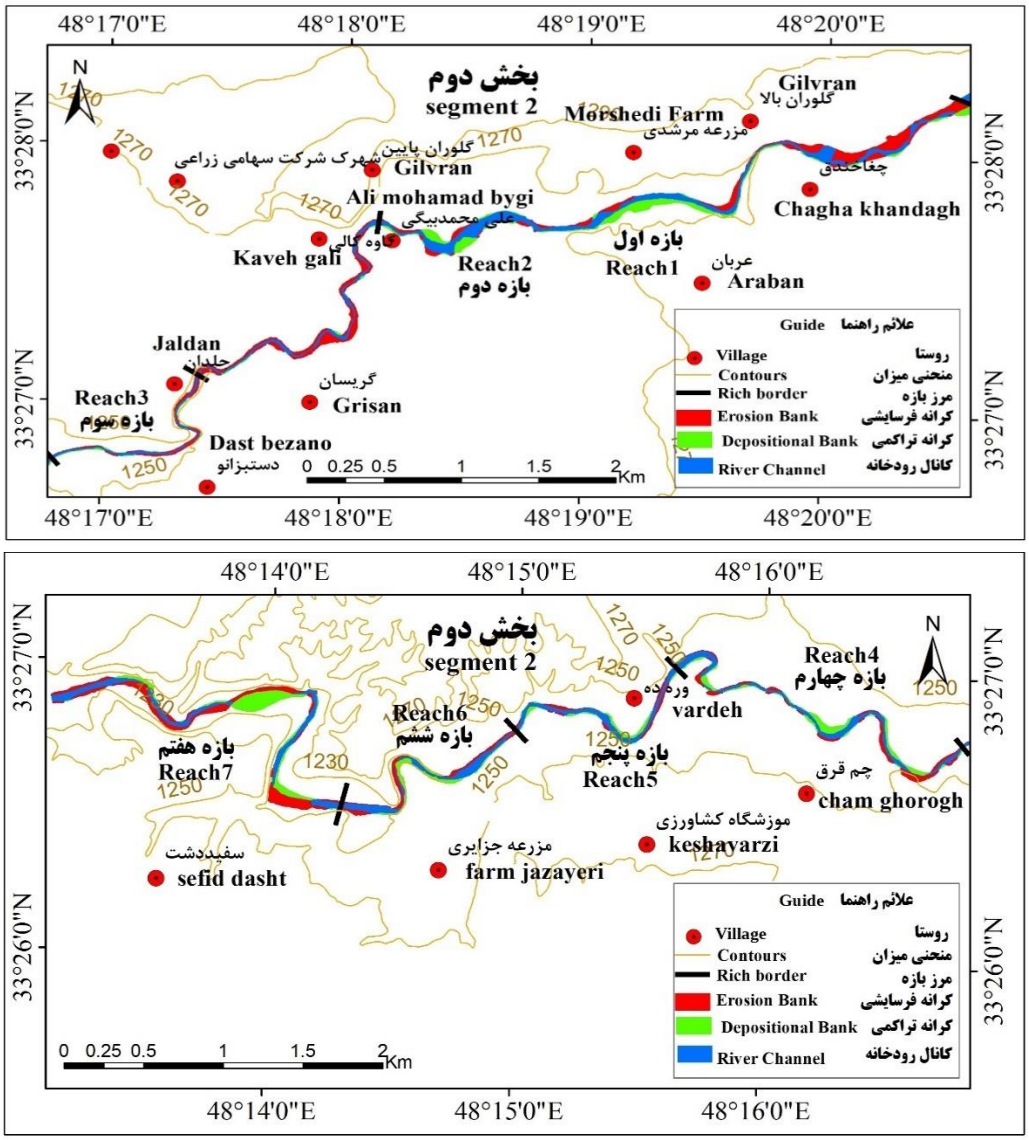
Table 4- Planform changes in the second reach based on channel area during the study years (m/y)

دوره زمانی Time period	2006-2025		2019-2025		2017-2019		2006-2017	
بازه reach	کرانه چپ Left Bank	کرانه راست Right Bank	کرانه چپ Left Bank	کرانه راست Right Bank	کرانه چپ Left Bank	کرانه راست Right Bank	کرانه چپ Left Bank	کرانه راست Right Bank
1	-0.55	0.80	0.77	0.09	1.72	5.83	-0.81	0.27
2	0.44	0.56	-0.34	0.12	1.52	4.35	0.05	0.09
3	0.03	0.22	-0.53	-0.83	1.33	3.99	-0.01	0.15
4	015	-0.3	-0.61	-2.17	2.93	9.68	0.09	-1.16
5	-0.09	-0.05	-0.97	-0.75	-0.32	3.9	0.14	-0.39
6	-0.34	0.41	-1.31	-0.26	2.17	7.05	-0.47	-0.48
7	0.11	0.31	0.77	1.49	4.78	0.53	0.05	-0.37
میانگین Average	.35	-0.09	-0.19	-0.62	5.09	2.24	-0.21	-0.23
RNCI	فرسایشی erosion	تراکمی depositional	تراکمی depositional	تراکمی depositional	فرسایشی erosion	فرسایشی erosion	تراکمی depositional	تراکمی depositional



شکل۷– الف) برش بستر رودخانه، ب) فرسایش حاشیه رودخانه در بخش دوم

Fig.7. a) Riverbed cross-section; b) bank erosion in the second reach

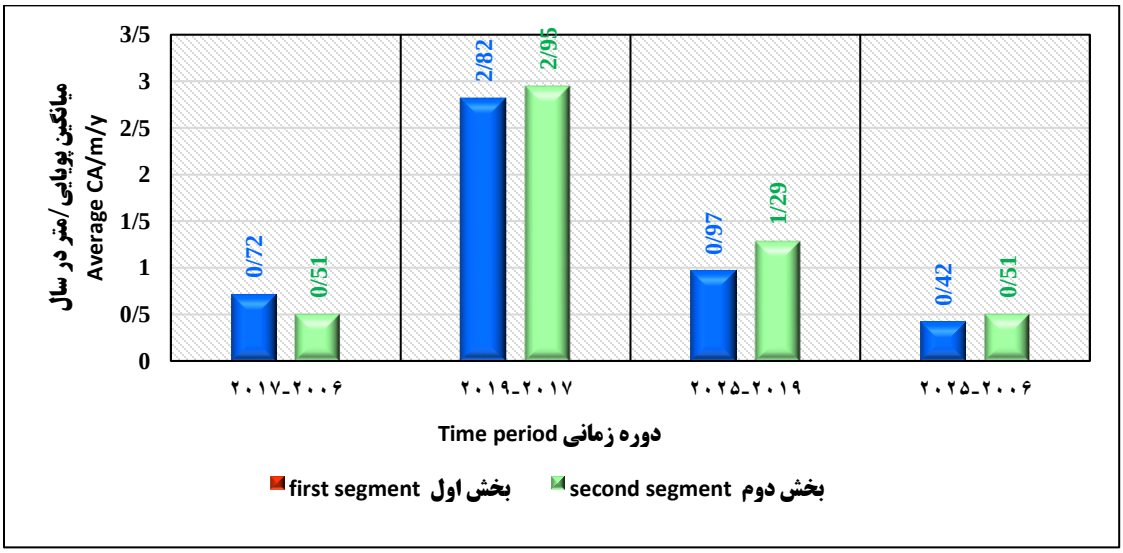


شکل۸ – تغییرات پلان رود از نظر شرایط تراکمی و فرسایشی بودن در بازه‌های بخش دوم

Fig.8. Planform changes of the river in terms of depositional and erosional conditions in the reaches of the second reach

جابه‌جایی کانال تغییرات در شکل و مورفولوژی کانال را توصیف می‌کند که شامل تغییر جانبی کناره‌های کانال (جابه‌جایی جانبی، عریض شدن و باریک شدن کانال) و یا تغییر عمودی بستر کانال (رسوب‌گذاری، حفر بستر) می‌شود. این تغییرات سیستماتیک زمانی(تکامل کانال) به تحلیل‌گر اجازه می‌دهد تا فرآیندهای کانال درگذشته و حال را تفسیر کند و همچنین تغییرات آینده کانال را پیش بینی کند. تغییرات کانال در منطقهٔ مورد مطالعه با استفاده از مقایسهٔ تصاویر سال‌های مختلف (تغییرات عرضی) و مشاهدات میدانی (تغییرات عمودی) انجام شد. مشاهدات اولیه از مقایسهٔ تصاویر، تغییرات قابل توجهی در عرض کانال را در بسیاری از بازه‌ها نشان داد. تغییرات گستردهٔ عرض کانال این امکان را فراهم کرد که میزان تغییرات در

این پژوهش به صورت کمی برآورد شود. مشاهدات میدانی نیز جهت بررسی، جمع‌آوری شواهد و اندازه‌گیری تغییرات عمودی با بررسی سازه‌های هیدرولیکی (پایه پل‌ها) و ویژگی‌های مورفولوژیکی و پوشش گیاهی کناره‌ها انجام شد. در بخش اول با توجه به نتایج به‌دست آمده از مقایسهٔ تصاویر سال‌های مختلف، مشاهدات و برداشت‌های میدانی تغییرات گسترده و قابل ملاحظه‌ای در عرض و عمق کانال در بازه‌های آن مشاهده شد. در دورهٔ زمانی اول خط مرکزی به طور میانگین ۰/۷۲ متر در سال جابه‌جایی داشته است. این پویایی باعث جابه‌جایی کانال در هر دو کرانه چپ و راست شده است (شکل ۹).



شکل۹- میانگین پویایی کانال در بخش اول و دوم رودخانه خرم رود در بازه زمانی ۲۰۲۵-۲۰۰۶

Fig.9. Average channel dynamics in the first and second reaches of Khorram River during 2006–2025

با توجه به میزان دبی رودخانه در طی این دورهٔ زمانی، جابه‌جایی کناره‌های این بخش از نوع تراکمی بوده است. به عبارت دیگر کاهش دبی اوج سیلاب و قدرت جریان در این دوره زمانی باعث شده است که عرض کانال رودخانه از میانگین ۴۰ متر به ۲۸ مترکاهش یابد علاوه بر این به علت کاهش بار بستر و فعالیت‌های انسانی (برداشت رسوب) به‌ناچار بستر خود را نیز حفر کرده است. در طی دورهٔ زمانی دوم، میزان جابه‌جایی خط مرکز کانال به بیشترین میزان خود ۲/۸۲ متر در سال می‌رسد. حجم زیاد جریان و رسوب ناشی از سیلاب شدید (دبی ۳۰/۹۳ متر مکعب بر ثانیه) در سال ۱۳۹۸ کناره‌های رودخانه در این بخش را به شدت فرسایش داده و باعث شده است که عرض کانال نسبت به دورهٔ قبل ۱۵/۵ متر (۴۳/۵ متر) گسترش پیدا کند. در دورهٔ سوم، افت جریان و بار رسوبی باعث جابه‌جایی خط مرکزی و تغییر مسیر جریان شده است که همین امر باعث شده که کناره‌های این بخش از رودخانه بعد از عریض شدن گسترده در دورهٔ قبل به حالت تراکمی تغییر وضعیت بدهند که کاهش ده متری در عرض کانال(۳۳/۵ متر) و عمیق شدن کانال از نشانه‌های تغییرات در این دوره زمانی هستند. به طور کلی بازه‌های رودخانه در این بخش در طی دوره زمانی ۲۰ سال (۲۰۲۵-۲۰۰۶) سطوح شدیدی از تغییرات جانبی کناره‌های کانال شامل جابجایی جانبی، عریض شدن و باریک شدن کانال و تغییرات عمودی بستر کانال را داشته‌اند. این نتایج را می‌توان در مطالعات مگدلنو و فرناندز (Magdaleno & Fernández-Yuste, 2011b) و اسماعیلی و دلیری (Esmaeili &

Daliri, 2019) مشاهده کرد. بر اساس داده‌های به‌دست آمده در بازۀ زمانی ۲۰۲۵-۲۰۰۶ ، رودخانه در وضعیت ناپایدار قرار داشته و نشان دهندۀ غیر طبیعی بودن تغییرات در رودخانه خرم‌رود است.

در بخش دوم، بازه‌های رودخانه در دورۀ زمانی اول از نظر میانگین جابه‌جایی خط مرکزی و پویایی کانال (۰/۵۱ متر) شرایط فعالی از خود نشان داده‌اند. با وجود تراکمی بودن بیشتر بازه‌ها در این بخش، تغییرات چشم‌گیری در جابه‌جایی کرانه‌ها ایجاد نشده است. میانگین عرض کانال در سال ۲۰۱۷ (۲۸/۳۶ متر) نسبت به سال ۲۰۰۶ (۲۸/۳۸ متر) اختلاف معناداری را نشان نمی‌دهد. با بررسی نتایج و تصاویر مربوط به این بازۀ زمانی، علّت عدم تعریض رودخانه را می‌توان مربوط به عدم وجود رسوب در جریان در نتیجه کاهش بار رسوبی، تثبت کناره‌ها توسط پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی (تغییر الگوی کشت) (Wang et al., 2015) دانست. در این مقطع زمانی رودخانه فاقد تغییرات عرضی بوده اما از نظر تغییرات عمق کانال، با توجه به عوامل ذکر شده در بالا، بستر خود را حفر کرده است. در بازۀ زمانی دوم، وقوع سیلاب با دبی m^3/s ۱۵۸/۶۷ در سال ۱۳۹۸، باعث ایجاد فرسایش قابل ملاحظه‌ای در بازه‌های این بخش شده است. مطالعه وینتربوتوم (Winterbottom, 2000) نشان داد که تغییرات عرضی و جانبی کانال را در پاسخ به سیلاب‌های شدید رخ می‌دهد و افزایش ناگهانی عرض کانال پس از سیلاب را به دنبال داشته است. در طی چند دهۀ اخیر، تغییرات هیدرولوژیکی در سطح حوضه باعث شده است دبی اوج سیلاب به شدت افزایش یافته و در نتیجه باعث بالا رفتن نرخ عرضۀ رسوب در بازه‌های مورد مطالعه شده است. به علت بزرگی این رخداد، خط مرکزی کانال در این بخش ۲/۹۵ متر جابه‌جا شده و در ادامه، عرض کانال از ۲۸/۳۶ متر به ۳۷/۸۱ متر گسترش یافته است. در دوره سوم زمانی، تغییرات خط مرکزی کانال به میزان ۱/۲۹ متر بوده و بیشتر کناره‌های بازه‌ها در حالت تراکمی هستند و نسبت به دوره قبل، کانال علاوه بر باریک‌تر شدن، حفر بستر را نیز داشته باشد. به طور کلی بازه‌های رودخانه در این بخش در طی دورۀ زمانی ۲۰ سال (۲۰۲۵-۲۰۰۶) رفتار متفاوتی داشته است. دورۀ قبل از وقوع سیلاب‌های بزرگ، بازه‌ها در این بخش صرفاً دچار فروسایی شده و کانال عملاً فاقد تعریض‌شدگی می‌باشد. اما در دوره بعد از وقوع سیلاب، با افزایش ناگهانی عرضه رسوب از یک طرف و حذف و تنگ شدن پوشش گیاهی، کرانه‌ها از دو طرف علاوه بر فرسایش بستر، گسترش قابل توجهی (۱۰/۴۵ متر) را تجربه کرده و باعث تشکیل دشت سیلابی در این بخش شده است. همانطور که مطالعه لائور و پارکر (Lauer & Parker, 2008) نشان دهندۀ تشکیل دشت‌های سیلابی به واسطۀ تغییرات عرضی کانال است. در حال حاضر رودخانه از نظر تغییرات خط مرکزی (۰/۵۱ متر) به وضعیت سال ۲۰۰۶ تغییر حالت داده است اما با این تفاوت که از نظر تغییرات عرضی (۳۶/۳۳ متر) نسبت به دورۀ ابتدایی هشت متر افزایش عرض داشته است.

مقایسۀ بخش شمالی و جنوبی منطقۀ مورد مطالعه نشان می‌دهد که بخش شمالی منطقۀ مورد مطالعه با طول ۱۶۱۳۸ متر و با الگوی سینوسی (۱/۲۹) با بارهای رسوبی پراکنده تا پیوسته در امتداد کناره‌ها با متوسط شیب ۰/۴۷ درصد در ارتفاعی بین ۱۳۳۰ متر تا ۱۴۱۰ متر قرار دارد. بررسی تصاویر و مشاهدات میدانی، توزیع فضایی تغییرات عرضی و عمودی کاملاً آشکاری را در این بخش نشان می‌دهد. مقایسه نتایج به‌دست آمده در طی دوره‌های زمانی این بخش از رودخانه نشان داد که عرض کانال در بازه‌های شش‌گانه در این بخش کاهش یافته و رودخانه دچار فروسایی شده است. همچنین با کاهش انرژی جریان، رودخانه رسوبات خود را که به طور غالب درشت دانه هستند در طول مسیر به‌ویژه در بازه‌های ابتدایی برجای گذاشته است و باعث تشکیل بارهای فعال و دشت‌های سیلابی در کناره‌های این بخش شده است که این امر کاهش عرض کانال را در پی داشته است. از طرف دیگر گستردگی عرضی کانال و وجود دشت‌های سیلابی در بستر رودخانه شرایط مناسبی را برای جابه‌جایی خط مرکزی کانال فراهم کرده است. جابه‌جایی خط مرکزی کانال نیز باعث جابه‌جایی کناره‌های کانال شده است و باعث حفر بستر و باریک شدن عرض کانال در این بخش از رودخانه شده است.

بخش جنوبی منطقهٔ مورد مطالعه، با طول ۱۷۲۱۲ متر و با الگوی پیچان‌رودی (۱/۴۵) در ارتفاعی بین ۱۲۱۰متر تا ۱۲۷۰ متر و متوسط شیب۰/۳۴درصد قرار دارد. در این بخش در ابتدای دورهٔ مورد مطالعه رودخانه با وجود تغییر در خط مرکزی کانال، تغییر محسوسی در عرض کناره‌های آن ایجاد نشده است و از نظر تغییرات عرضی نسبت به سال ۲۰۰۶ ثابت مانده است اما رودخانه دچار فروسایی بستر و فرسایش شدیدتری نسبت به بخش شمالی شده است (شکل ۱۰). این بخش به علت کاهش بار رسوبی جریان و وجود کرانه‌های با رسوبات ریزدانه و مرتفع و تثبیت شده توسط پوشش گیاهی دچار فروسایی زیادی شده است. پوشش گیاهی کناره‌ها در این بازهٔ زمانی از عوامل مهم کاهش عرضهٔ رسوب به رودخانه بوده و از طرف دیگر با محصور کردن جریان باعث حفظ عرض کانال شده است. کاهش سطح رودخانه در نتیجه فروسایی در این بخش باعث شده است که پای کناره‌ها فرسایش شدیدی را تجربه کنند و همین امر باعث شده که ارتفاع کناره‌ها افزایش پیدا کند. پس از وقوع سیلاب‌های بزرگ، عرض کانال به علت زیربری و فرسایش کناره‌ها و حذف پوشش گیاهی گسترش پیدا می‌کند. افزایش رسوب و کاهش و حذف پوشش گیاهی کناره‌ها باعث شده است که با جابه‌جا شدن خط مرکزی کانال، کناره‌های آن نیز تغییر پیدا کرده و همین امر باعث تشکیل دشت‌های سیلابی در این بخش شده است. با فرسایش کناره‌ها و تشکیل دشت سیلابی، این بخش از رودخانه نسبت به ابتدای دوره علاوه بر حفر بستر، گسترش عرض کانال را بر خلاف بخش شمالی داشته است. بر اساس یافته‌های فوق و نتایج پژوهش‌های گوش و همکاران (Ghosh et al., 2023)، رحیمی و همکاران (Rahimi et al., 2024) و حسین‌زاده و همکاران (Hosseinzadeh et al., 2024) شاخص تغییر شبکهٔ رودخانه(RNCI) می‌تواند نواحی مستعد تغییرات شدید کانال را جهت شناسایی و مدیریت بهتر آنها فراهم کند. با وجود اینکه کرانه‌های کانال به ویژه در رودخانه‌های آبرفتی به ندرت ثابت است و در طول زمان با متراکم شدن و فروسایی کانال نوسان پیدا می‌کند اما میزان این تغییرات در بخش‌های مورد مطالعه در طول دورهٔ زمانی مورد بررسی نشان دهندهٔ وضعیت غیر طبیعی بودن رودخانه می‌باشد. با اینکه گسترش جانبی کانال یک فرآیند حیاتی است که اکوسیستم‌های رودخانه‌ای را حفظ می‌کند و بخشی از عملکرد منظم رودخانه‌ها است. با این‌حال، با توجه به ارزش بالای زمین در این منطقه به واسطه کوهستانی بودن آن می‌تواند منجر به از دست دادن زمین‌های کشاورزی و آسیب به زیرساخت‌ها و مناطق مسکونی شود. میزان این آسیب‌پذیری علاوه بر ایجاد خسارت به زمین‌های کشاورزی و نقاط مسکونی روستایی در طول هر دو بخش از رودخانه، در بخش شمالی به علت قرار داشتن شهر خرم آباد در پایین دست آن به مراتب خیلی بیشتر و تاثیرگذارتر از بخش جنوبی منطقهٔ مورد مطالعه است. از این رو جهت مدیریت بهتر و کارآمدتر رودخانه در این بخش، شناسایی و مدیریت نواحی که در آن ممکن است تغییرات شدید کانال رخ دهد، ضروری است.



شکل۱۰- مقایسهٔ پسروی و پیشروی کرانه در بخش شمالی و جنوبی رودخانهٔ خرم‌رود در دورهٔ زمانی ۲۰۲۵-۲۰۰۶

Fig.10. Comparison of bank retreat and advancement in the northern and southern parts of the Khoramroud River during the period 2006-2025

نتیجه‌گیری

مطالعهٔ حاضر به بررسی تغییرات مورفولوژیکی کانال رودخانه خرم‌رود در دو بخش شمالی و جنوبی شهر خرم آباد طی یک دورهٔ ۲۰ ساله (۲۰۲۵–۲۰۰۶) پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که این رودخانه از نظر تغییرات عرضی و فروسایی کانال در وضعیت ناپایداری نسبتاً زیاد با تغییرات غیر طبیعی در ساختار کانال قرار دارد و رفتار آن تحت تأثیر عوامل هیدرولوژیکی (سیلاب‌ها، تغییرات دبی و بار رسوبی) و فعالیت‌های انسانی (برداشت رسوب، تثبت کناره‌ها توسط پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی از طریق تغییر الگوی کشت) بوده است. در بخش شمالی، رودخانه در دوره‌های مختلف شاهد نوسانات شدید عرض رودخانه (کاهش از ۴۰ به ۲۸ متر در دوره‌های تراکمی و سپس افزایش به ۴۳ متر در اثر سیلاب‌های شدید) و جابجایی خط مرکزی کانال (تا ۲/۸۲ متر در سال) بوده است. این تغییرات عمدتاً ناشی از وقوع سیلاب‌های شدید (مانند سیلاب ۱۳۹۸ با دبی ۳۰/۹۳ مترمکعب بر ثانیه) و کاهش بار رسوبی بوده که منجر به فرسایش کناره‌ها، تشکیل دشت‌های سیلابی و حفر بستر شده است. در مقابل، بخش جنوبی با الگوی پیچان‌رودی، اگرچه در ابتدا ثبات نسبی در عرض کانال داشت، ولی پس از سیلاب‌ها به دلیل فرسایش کناره‌ها و حذف پوشش گیاهی، گسترش عرضی قابل توجهی (۱۰/۴۵ متر) را تجربه کرد.

تفاوت اصلی بین دو بخش، در واکنش به تغییرات هیدرولوژیکی و نقش پوشش گیاهی بوده است. در بخش شمالی، کاهش دبی و بار رسوبی باعث باریک شدن کانال و غلبه رسوبات گراولی (درشت دانه)، در حالی که در بخش جنوبی، پوشش گیاهی ابتدا از گسترش عرضی جلوگیری کرد، ولی پس از سیلاب بزرگ سال ۱۳۹۸، فرسایش کناره‌ها و تشکیل دشت سیلابی رخ داد. این تغییرات نه‌تنها نشان‌دهنده تأثیرپذیری شدید رودخانه از رویدادهای حدی است، بلکه بیانگر نقش کلیدی فعالیت‌های انسانی در تشدید ناپایداری مورفولوژیکی است. بنابراین عوامل کلیدی مؤثر بر این تغییرات شامل نوسانات دبی جریان، تغییرات بار رسوبی، فعالیت‌های انسانی (برداشت رسوب، تغییر الگوی کشت)، و نقش پوشش گیاهی در تثبیت یا تشدید فرسایش

بودند. این تغییرات نه‌تنها تعادل هیدرومورفولوژیکی رودخانه را مختل کرده، بلکه با تهدید زمین‌های کشاورزی و زیرساخت‌ها، به‌ویژه در بخش شمالی (به‌دلیل مجاورت با شهر خرم‌آباد)، پیامدهای جدی به همراه دارد.

از دیدگاه مدیریتی، یافته‌های این پژوهش حاکی از ضرورت اتخاذ راهبردهای پایدار برای کنترل تغییرات کانال، به‌ویژه در بخش شمالی است که نزدیکی به شهر خرم‌آباد، خطرات اقتصادی و اجتماعی بیشتری را به همراه دارد. اقداماتی مانند تثبیت کناره‌ها با روش‌های مهندسی اکولوژیک، مدیریت پوشش گیاهی و کنترل برداشت رسوب می‌تواند به کاهش آسیب‌پذیری سیستم رودخانه کمک کند. همچنین، پیش‌بینی تغییرات آینده با استفاده از مدل‌های مورفودینامیکی و در نظر گرفتن سناریوهای تغییر اقلیم، به عنوان گام بعدی پژوهش پیشنهاد می‌شود. در نهایت، این مطالعه بر اهمیت یکپارچه‌نگری عوامل طبیعی و انسانی در مدیریت پایدار رودخانه‌های آبرفتی تأکید دارد.

References

Abedini, M., Fateh Elahi, P., & NezafatTakle, B. (2024). Investigating the lateral erosion of Darehroud river and its classification using Rasgen model (Case study: Horand city - East Azerbaijan). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(3), 101-128. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.78374.1272

Ali, P. Y., Jie, D., Khan, A., Sravanthi, N., Rao, L. A., & Hao, C. (2019). Channel migration characteristics of the Yamuna River from 1954 to 2015 in the vicinity of Agra, India: A case study using remote sensing and GIS. *International Journal of River Basin Management*, *17*(3), 367-375. https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1566238

Annayat, W., & Sil, B. S. (2020). Changes in morphometric meander parameters and prediction of meander channel migration for the alluvial part of the Barak River. *Journal of the Geological Society of India*, *96*(3), 279-291. https://doi.org/10.1007/s12594-020-1548-3

Arian Tabar, H., Jabbari, E., & Farahpour, M. M. (2021). Investigating the Role of the Movements of Khorram Abad's Hidden Thrust Fault in the Evolution of Khorram Abad River's Drainage System. *Geographical Research*, *36*(2), 205-216. [In Persian] https://georesearch.ir/article-1-1020-fa.html

Azim, N. M. A. (2024). Long-term hydro-morphological changes in rivers: a case study. *Water Practice & Technology*, *19*(8), 3285-3296. https://doi.org/10.2166/wpt.2024.196

Comiti, F., Lucia, A., & Rickenmann, D. (2016). Large wood recruitment and transport during large floods: a review. *Geomorphology*, 269, 23–39.https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.016

Esmaeili, R., & Daliri, R. (2019). Morphological and morphodynamic analysis of meanders of the Shelman Rud River, Gilan Province. *Earth Science Research*, *10*(39), 141–153. [In Persian] https://doi.org/10.52547/esrj.10.3.141

Esmaili, R., & Nourizadeh Nesheli, N. (2024). Evaluation of the morphological changes of Haraz river following human pressures in the Amol city, Mazandaran. *Journal of Hydrogeomorphology*, *11*(40), 57-40. [In Persian] https://doi.org/10.22034/hyd.2024.61151.1733

García-Martínez, B., & Rinaldi, M. (2022). Changes in meander geometry over the last 250 years along the lower Guadalquivir River (southern Spain) in response to hydrological and human factors. *Geomorphology*, *410*, 108284. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108284

Ghosh, S., Hoque, M. M., Islam, A., Barman, S. D., Mahammad, S., Rahman, A., & Maji, N. K. (2023). Characterizing floods and reviewing flood management strategies for better community resilience in a tropical river basin, India. *Natural Hazards*, *115*(2), 1799-1832. https://doi.org/10.1007/s11069-022-05618-y

Hosseinzadeh, M. M., Esmaeili, R., & Nabizadeh Bahnamiri, M. (2022). Analysis of temporal changes and stability of the Neka River watershed planform - Mazandaran. *Quarterly Scientific-Research Journal of Geographic Information "Sepehr", 31*(124), 39-52. [In Persian] https://doi.org/10.22131/sepehr.2023.555968.2881

Hosseinzadeh, M. M., Salehi Milani, A. R., & Hydari, S. (2024). Hydrogeomorphic changes of the Cheshmeh Kileh River in the coastal plain Western Mazandaran. *Physical Geography Research*, *56*(3), 95-114. [In Persian] https://jphgr.ut.ac.ir/article_100260_en.html

Hosseinzadeh, S. R., Rashidi, M., Sepehr, A., Zarei, H., & Khaneh Bad, M. (2018). Study of geomorphological changes in the Karun River bed and its causes from 1954-2011 (1955 to 2012). *Quantitative Geomorphological Research*, *5*(1), 43-59. [In Persian] https://doi.org/20.1001.1.22519424.1395.5.1.4.4

Konrad, C., Berge, H., Fuerstenberg, R., Steff, K., Olsen, T., & Guyenet, J. (2011). Channel dynamics in the Middle Green River, Washington, from 1936 to 2002. *Northwest Science*, *85*(1), 1-14. https://doi.org/10.3955/046.085.0101

Lauer, J. W., & Parker, G. (2008). Net local removal of floodplain sediment by river meander migration. *Geomorphology*, *96*(1-2), 123-149. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.08.003

Magdaleno, F., & Fernández, J. A. (2011a). Hydromorphological alteration of a large Mediterranean river: relative role of high and low flows on the evolution of riparian forests and channel morphology. *River Research and Applications*, *27*(3), 374-387. https://doi.org/10.1002/rra.1368

Magdaleno, F., & Fernández-Yuste, J. A. (2011b). Meander dynamics in a changing river corridor. *Geomorphology*, *130*(3-4), 197-207. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.016

Magliulo, P., Bozzi, F., & Pignone, M. (2016). Assessing the planform changes of the Tammaro River (southern Italy) from 1870 to 1955 using a GIS-aided historical map analysis. *Environmental Earth Sciences*, *75*(4), 355. https://doi.org/10.1007/s12665-016-5266-5

Magliulo, P., Bozzi, F., Leone, G., Fiorillo, F., Leone, N., Russo, F., & Valente, A. (2021). Channel adjustments over 140 years in response to extreme floods and land-use change, Tammaro River, southern Italy. *Geomorphology*, *383*, 107715. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107715

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

Rahimi, N., Khaleghi, S., Salehipour Milani, A. (2024). The effect of floods on river morphology changes Case study: Sadij River, Hormozgan Province. *Hydrogeomorphology, 11(38), 141–160* [In Persian] https://doi.org/10.22034/hyd.2024.59641.1717

Rezaei Moghadam, M. H., Mohammadfar, A., & Valizadeh Kamran, K. (2013). Changes Detection and identification of erosion risk areas of Aji Chay River between Khaje to Vanyar. *Geography and Environmental Planning*, *23*(4), 1-14. [In Persian] https://doi.org/20.1001.1.20085362.1391.23.4.1.5

Rinaldi, M. (2003). Recent channel adjustments in alluvial rivers of Tuscany, Central Italy. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, *28*(6), 587-608. https://doi.org/10.1002/esp.464

Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F., Bussettini, M., Belletti, B., Nardi, L., ... & Golfieri, B. (2012). Guidebook for the evaluation of stream morphological conditions by the Morphological Quality Index (MQI). *Version*, *1*, 85.

Ruiz-Villanueva, V., Piégay, H., Scorpio, V., Bachmann, A., Brousse, G., Cavalli, M., ... & Wyżga, B. (2023). River widening in mountain and foothill areas during floods: Insights from a meta-analysis of 51

European Rivers. *Science of the Total Environment*, *903*, 166103. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166103

Saffari, A., Ghanavati, E., & Alipour, D. A. H. (2023). Investigation of morphology changes in Karun River and its hazards (Case Study: Bandagir to Khorramshahr). *Applied Researches in Geographical Sciences, 23*(68), 199-222. [In Persian] http://dx.doi.org/10.52547/jgs.23.68.199

Surian, N., Rinaldi, M., Pellegrini, L., Audisio, C., Maraga, F., Teruggi, L., ... & Ziliani, L. (2009). Channel adjustments in northern and central Italy over the last 200 years. In: James, L.A., Rathburn, S. L. & Whittecar, G. R. (Eds.). *Management and restoration of fluvial systems with broad historicalchanges and human impacts*. Geological Society of America, 451, 83–95. https://doi.org/10.1130/2009.2451(05)

Wang, Z. B., Van Maren, D. S., Ding, P. X., Yang, S. L., Van Prooijen, B. C., De Vet, P. L. M., ... & He, Q. (2015). Human impacts on morphodynamic thresholds in estuarine systems. *Continental Shelf Research*, *111*, 174-183. https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.08.009

Winterbottom, S. J. (2000). Medium and short-term channel planform changes on the Rivers Tay and Tummel, Scotland. *Geomorphology*, *34*(3-4), 195-208. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00007-6

Yamani, M., & Goorabi, A. (2015). Prediction of kordan river geometric changes in the meandering Range. *Environmental Erosion Research Journal*, *5*(3), 1-14. [In Persian] https://doi.org/20.1001.1.22517812.1394.5.3.1.1

Vol. 14, No.4, Winter 2025, p. 66-84 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94360.1591 OPEN ACCESS

Landslide Susceptibility Analysis with Emphasis on Earthquake Impacts (Case Study: Karand to Sarpolzahab Corridor)

Hamid Ganjaeian [1*], Milad Firozeh [2], Ali Mirakhorli [3], Toktam Yazdani [4]

[1*] Ph.D. in Geomorphology, University of Tehran, Tehran, Iran
[2] M.Sc. in Urban Engineering, Urban Planning Major, Allameh Tabatabaei University, Tehran, Iran
[3] Ph.D. Student in Geomorphology, University of Tehran, Tehran, Iran
[4] Ph.D. in Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 15 June 2025

Revised: 09 September 2025

Accepted: 11 September 2025

Available Online: 14 September 2025

Keywords:

Landslide Susceptibility

Earthquake

Earthquake-induced landslide

Remote Sensing

Slope Stability

ABSTRACT

Landslides are among the most significant hazards threatening many mountainous regions. One such high risk area, due to its geomorphological and tectonic characteristics, is the transport corridor between Karand and Sarpolzahab in Kermanshah Province. In this study, Sentinel-1 radar imagery, MODIS satellite images, the 1:100,000 digital geological map of the area, and the 12.5 m ALOS PALSAR Digital Elevation Model were used as the primary data sources. The main analytical tools applied included GMTSAR, Google Earth Engine, and ArcGIS. Using relative weight coefficient methods, fuzzy logic, and radar interferometry, landslide-prone areas were identified while considering the impacts of the Ezgaleh earthquake. Results indicate that vertical ground displacements in the study area ranged from −5 to 334 mm. Given that such displacements can significantly contribute to slope instability and trigger landslides, zones exhibiting both high susceptibility to landslides and vertical displacements exceeding 100 mm were classified as areas with the greatest landslide risk. Accordingly, mid-slope areas and those adjacent to Sarpolzahab city, owing to both their environmental susceptibility and substantial vertical displacements, were identified as the most hazardous zones in terms of landslide occurrence.

* Corresponding author: Hamid Ganjaeian E-mail address: h.ganjaeian@ut.ac.ir

How to cite this article: Ganjaeian, H., Firozeh, M., Mirakhorli, A., & Yazdani, T. (2025). Landslide Susceptibility Analysis with Emphasis on Earthquake Impacts (Case Study: Karand to Sarpolzahab Corridor). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 14*(4), 66-84. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.94360.1591

©2025 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

Landslides are among the most destructive geomorphological hazards, involving the sudden or gradual movement of soil, rock or debris downslope under the influence of gravity. This phenomenon is particularly common in mountainous and steep terrains and can result in severe consequences, including infrastructure damage, loss of agricultural land, human casualties and disruption of transportation and communication networks. Landslide occurrence is influenced by both natural and anthropogenic factors. Natural triggers include intense rainfall, earthquakes, snowmelt, erosion processes and geological conditions, while human activities such as unplanned road construction, deforestation, landuse change, and construction on steep slopes can significantly increase landslide susceptibility. The impacts of landslides are not limited to physical damage but also extend to economic, social, and environmental dimensions. Economically, they impose substantial reconstruction costs and lead to the destruction of farmlands and infrastructure. Socially, landslides may cause fatalities, displacement, forced migration and a decline in quality of life. Environmentally, they contribute to vegetation loss, habitat destruction, and the formation of landslide dams. Therefore, landslides represent a multidimensional hazard that threatens both human security and environmental sustainability. Due to variations in geological, geomorphological, hydrological and topographic conditions, different regions exhibit varying levels of landslide susceptibility. Iran's geographical setting has made large parts of the country prone to landslide hazards, particularly the western regions of Kermanshah Province within the Zagros mountainous belt. This area is characterized by steep slopes, high elevations, extensive transportation networks, and intense human activities, resulting in high vulnerability to landslides. Moreover, the active tectonic setting and frequent earthquakes, including the Mw 7.3 Azgaleh earthquake in 2017, have played a crucial role in slope destabilization. Beyond their immediate impacts, such earthquakes induce subtle changes that weaken slope stability and increase landslide potential. Accordingly, this study aims to identify landslide-prone areas along the transportation corridor between Kerend and Sarpol-e Zahab cities, with a particular emphasis on tectonic factors.

Material and Methods

This study utilized Sentinel-1 radar images acquired before (07/11/2017) and after (19/11/2017) the Azgaleh earthquake, MODIS satellite imagery from 2020 to 2024, 1:100,000 geological maps of the Kerend and Sarpol-e Zahab sheets, and a 12.5 m resolution ALOS PALSAR digital elevation model as the primary datasets. The main analytical tools included GMTSAR (version 6.0) for interferometric processing and ArcGIS for data standardization and map production. The research was conducted in three main stages. First, landslide susceptibility was assessed using eight parameters: distance to roads, distance to rivers, elevation, slope, aspect, lithology, distance to faults, and vegetation cover. All layers were standardized to a common scale ranging from 0 to 1. Weights were assigned to each parameter based on expert judgment from ten geomorphology specialists using the relative weighting method. In the second stage, the effects of the 2017 Azgaleh earthquake were evaluated using Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR). Sentinel-1 images acquired before and after the earthquake were processed to calculate vertical ground displacement over a 12 day period. In the final stage, the landslide susceptibility map was integrated with the vertical displacement map. Areas exhibiting both high displacement and high susceptibility were identified as zones exposed to landslide hazard.

Results and Discussion

The results of this study indicate that the 2017 Azgaleh earthquake played a significant role in intensifying slope instability and increasing landslide susceptibility within the study area. The analysis of Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) data demonstrates that, beyond its immediate and visible impacts, the earthquake induced subtle but highly influential changes in slope structures. One of the most critical of these changes is the substantial vertical ground displacement, which can be considered a key factor in weakening the geomechanical equilibrium of slopes. Based on the vertical displacement map derived from Sentinel-1 imagery, ground surface deformation within the study area

ranged from −5 to 334 mm. This wide range of displacement values reflects the heterogeneous response of different geological units and slope conditions to seismic stress. In particular, areas characterized by weaker lithological units, moderate to steep slopes, and proximity to active faults experienced the highest levels of vertical displacement. These findings are consistent with previous studies conducted in the seismically active Zagros region, which emphasize that earthquakes can alter slope structures and significantly increase the likelihood of subsequent landslides over short to medium-term periods. In this research, areas exhibiting vertical displacement greater than 100 mm were classified as unstable zones. The integration of these zones with the landslide susceptibility map revealed a strong spatial correspondence between areas of high landslide potential and zones affected by intense seismic-induced displacement. This overlap is especially pronounced in the midslope sections of the region and in the vicinity of Sarpol-e Zahab city. These areas are characterized not only by favorable geomorphological conditions for landsliding such as appropriate slope gradients, unstable lithologies, and sparse vegetation cover but also by direct exposure to earthquake-induced stress and deformation.

Conclusion

The results of this study demonstrate that integrating radar remote sensing data with multi criteria decision making models is an effective approach for identifying and zoning landslide prone areas in mountainous and seismically active regions. The application of the fuzzy gamma method for combining environmental information layers such as slope, lithology, elevation, distance to faults, and vegetation cover enabled the simultaneous analysis of multiple contributing factors while reducing uncertainty inherent in spatial data. The findings indicate that the central sections of the Kerend–Sarpol-e Zahab transportation corridor exhibit the highest landslide susceptibility due to their specific geological and geomorphological characteristics. The analysis of the 2017 Azgaleh earthquake using the DInSAR technique revealed that this seismic event played a decisive role in exacerbating slope instability. Significant vertical displacements, exceeding 100 mm in several locations and reaching much higher values in certain areas, highlight the profound impact of the earthquake on slope structures and stability. Although such deformations may not immediately result in landslide occurrence, they substantially increase slope vulnerability and predispose hillslopes to failure under subsequent triggering factors such as intense rainfall or smaller seismic events. One of the key contributions of this research is the demonstration of the importance of incorporating indirect and subtle seismic effects into landslide hazard assessments. The results show that areas experiencing vertical displacement greater than 100 mm particularly around Sarpol-e Zahab city and within the mid-slope zones fall into high and very high hazard classes. This spatial coincidence between environmental susceptibility factors and earthquake-induced deformation emphasizes the need to move beyond static landslide models toward dynamic, multi-source hazard assessment frameworks. Overall, the findings of this study provide a valuable scientific basis for landuse planning, infrastructure development, and disaster risk management in seismically active regions. The produced landslide susceptibility and hazard maps offer practical tools for decision makers to identify high risk areas and implement preventive measures such as slope stabilization, route realignment, and restrictions on construction activities in hazardous zones.

جلد ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴ ، ص ۸۴-۶۶ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94360.1591 دسترسی آزاد

تحلیل پتانسیل وقوع زمین‌لغزش با تأکید بر تأثیر زمین‌لرزه‌ها (مطالعهٔ موردی: مسیر ارتباطی کرند تا سرپل‌ذهاب)

حمید گنجائیان*[۱]، میلاد فیروزه[۲]، علی میرآخورلی[۳]، تکتم یزدانی[۴]

[۱*] دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۲] کارشناسی ارشد مهندسی شهرسازی، گرایش برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران
[۳] دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۴] دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰

کلمات کلیدی:

پتانسیل وقوع زمین‌لغزش

زمین‌لرزه

زمین لغزش ناشی از زمین‌لرزه

سنجش از دور

پایداری دامنه

چکیده

یکی از مخاطراتی که بسیاری از مناطق کوهستانی را تهدید می‌کند، زمین‌لغزش است. از جمله مناطقی که به دلیل وضعیت ژئومورفولوژیکی و تکتونیکی، پتانسیل بالایی از نظر وقوع این مخاطره دارد، مسیر ارتباطی کرند تا سرپل‌ذهاب در استان کرمانشاه است. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در این محدوده پرداخته شده است. در این تحقیق از تصاویر راداری Sentinel 1، تصاویر ماهواره MODIS، لایهٔ رقومی نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه و مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR به‌عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای تحقیق، GMTSAR، سامانه گوگل ارث انجین و ArcGIS بوده است. در این تحقیق با استفاده از روش‌های ضریب وزنی نسبی، منطق فازی و تداخل‌سنجی راداری، مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش با در نظر گرفتن تأثیرات زمین‌لرزه ازگله شناسایی شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، محدودهٔ مطالعاتی تحت تأثیر زمین‌لرزه ازگله بین ۵- تا ۳۳۴ میلیمتر جابه‌جایی عمودی داشته است. با توجه به اینکه جابه‌جایی رخ داده می‌تواند نقش مهمی در ناپایداری دامنه‌ها و آماده حرکت کردن آن‌ها داشته باشد، در این پژوهش مناطقی که دارای پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین‌لغزش بوده‌اند و همچنین جابه‌جایی بیش از ۱۰۰ میلیمتری داشته‌اند شناسایی شده و به‌عنوان مناطق دارای بالاترین احتمال وقوع زمین‌لغزش معرفی شده‌اند. بر اساس نتایج حاصله، دامنه‌های میانی منطقه و مناطق نزدیک شهر سرپل‌ذهاب به دلیل اینکه هم از نظر پارامترهای محیطی مستعد وقوع زمین‌لغزش هستند و هم اینکه دارای جابه‌جایی عمودی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر بوده‌اند، به‌عنوان مناطق در معرض مخاطره زمین‌لغزش شناسایی شده است.

*نویسندهٔ مسئول: حمید گنجائیان
Email: h.ganjaeian@ut.ac.ir

مقدمه

زمین‌لغزش یکی از مهم‌ترین و مخرب‌ترین پدیده‌های ژئومورفولوژیک به شمار می‌رود که به جابه‌جایی ناگهانی یا تدریجی توده‌ای از خاک، سنگ یا رسوب در امتداد شیب منجر می‌شود (Zhang, Wang & Xia, 2012; Addis, 2023). این پدیده به‌ویژه در نواحی کوهستانی و دامنه‌دار رخ می‌دهد و می‌تواند خسارات گسترده‌ای همچون تخریب زیرساخت‌ها، از بین رفتن زمین‌های کشاورزی، تلفات انسانی و اختلال در شبکه‌های حمل‌ونقل و ارتباطی برجای گذارد (Adnan et al., 2020; Zhou et al., 2023).

عوامل متعددی در بروز زمین‌لغزش نقش دارند که به دو دسته طبیعی و انسانی تقسیم می‌شوند. در میان عوامل طبیعی می‌توان به بارش‌های شدید، زمین‌لرزه، ذوب برف، فرسایش و شرایط زمین‌شناسی اشاره کرد (Jaafari, 2024). از سوی دیگر، فعالیت‌های انسانی مانند توسعه بی‌برنامه راه‌ها (Khazaei & Ghaemi, 2015; Ebrahimi, Zakerian, Dawoudian & Amir-Ahmadi, 2018)، جنگل‌زدایی، تغییر کاربری اراضی و ساخت‌وساز در مناطق پرشیب نیز می‌توانند وقوع این مخاطره را تشدید کنند (Novellino, Salari, Nayeri, Amani & Ganjaeian, 2017; Pennington & Leeming, 2024).

پیامدهای زمین‌لغزش صرفاً محدود به تخریب کالبدی نیست و آثار اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی متعددی را در پی دارد. در بعد اقتصادی، هزینه‌های بازسازی، نابودی اراضی کشاورزی و تخریب زیرساخت‌ها تحمیل می‌شود (Negahban, Peysoozi, Ganjaeian & Norozi, 2021; Ganjaeian, Rezaei Arefi, Peysoozi & Emami, 2021). در بعد اجتماعی، زمین‌لغزش‌ها می‌توانند باعث تلفات انسانی، آوارگی، مهاجرت اجباری و کاهش کیفیت زندگی شوند. همچنین از منظر زیست‌محیطی، نابودی پوشش‌گیاهی، تخریب زیستگاه‌های جانوری و ایجاد زمین‌لغزش سدی، از جمله پیامدهای مهم آن است (Walker & Shiels, 2013). بنابراین، زمین‌لغزش پدیده‌ای چندبعدی است که امنیت انسانی و پایداری محیطی را تهدید می‌کند (Miao, Wu & Xie, 2018).

مناطق مختلف تحت تأثیر وضعیت زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هیدرولوژی و توپوگرافی، پتانسیل‌های متفاوتی از نظر بروز مخاطرات طبیعی از جمله زمین‌لغزش دارند (Negahban, Ganjaeian, Ebrahimi & Emami, 2019; Mohammahkhan, Ganjaeian, Shahri & Abbaszade, 2019; Asadi, Ganjaeian & Javedani, 2024). موقعیت جغرافیایی ایران سبب شده است تا بخش‌های زیادی از آن در معرض مخاطره زمین‌لغزش باشد (Rezapoor, Jabbari & Bahrami, 2023). از جمله مناطقی که پتانسیل بالایی از نظر وقوع این مخاطره دارد، مناطق غربی استان کرمانشاه در واحد کوهستانی زاگرس است. این منطقه به ارتفاع و شیب زیاد و همچنین توسعه خطوط ارتباطی و سایر فعالیت‌های انسانی، پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی در برابر مخاطره زمین‌لغزش دارد. علاوه بر موارد ذکر شده، نکته‌ای که کم‌تر مورد توجه قرار گرفته شده است، وضعیت تکتونیکی منطقه و زمین‌لرزه‌های رخ داده است. در واقع، منطقهٔ مورد مطالعه دارای وضعیت تکتونیکی فعالی است و همین مسئله سبب بروز زمین‌لرزه‌های زیادی از جمله زمین‌لرزه ۷/۳ ریشتری ازگله (در سال ۱۳۹۶) در این منطقه شده است (Ganjaeian, Yamani, Goorabi & Maghsoudi, 2020). زمین‌لرزه‌های رخ داده، با پیامدهای محسوس و نامحسوس زیادی همراه بوده است و از جمله پیامدهای نامحسوس آن، تأثیر بر روی دامنه‌ها و مستعد حرکت کردن آن‌ها بوده است (Ganjaeian, Yamani, Goorabi & Maghsoudi, 2024). با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در مسیر ارتباطی شهر کرند تا شهر سرپل‌ذهاب با تأکید بر عوامل تکتونیکی پرداخته شده است.

در ارتباط با موضوع مورد مطالعهٔ تحقیقات مختلفی صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به اسمره (Asmare, 2023) اشاره کرد که با استفاده از روش تلفیقی Fuzzy-AHP، به شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در مناطق شمال غربی اتیوپی پرداختند و نشان دادند که ۲۰ درصد منطقه، دارای پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی است. ژانگ و همکاران (Zhang, Xie, Xu, Li & Chen, 2024) بر مبنای پارامترهای محیطی، روش AHP و مدلسازی جنگل تصادفی، به بررسی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در استان چوشیونگ چین پرداختند و نشان دادند که مناطق شمال غربی این استان، پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین‌لغزش دارد. ماسرورو و همکاران (Masruroh, Irawan & Anam, 2025) به مدلسازی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در منطقهٔ جاوه اندونزی پرداختند.

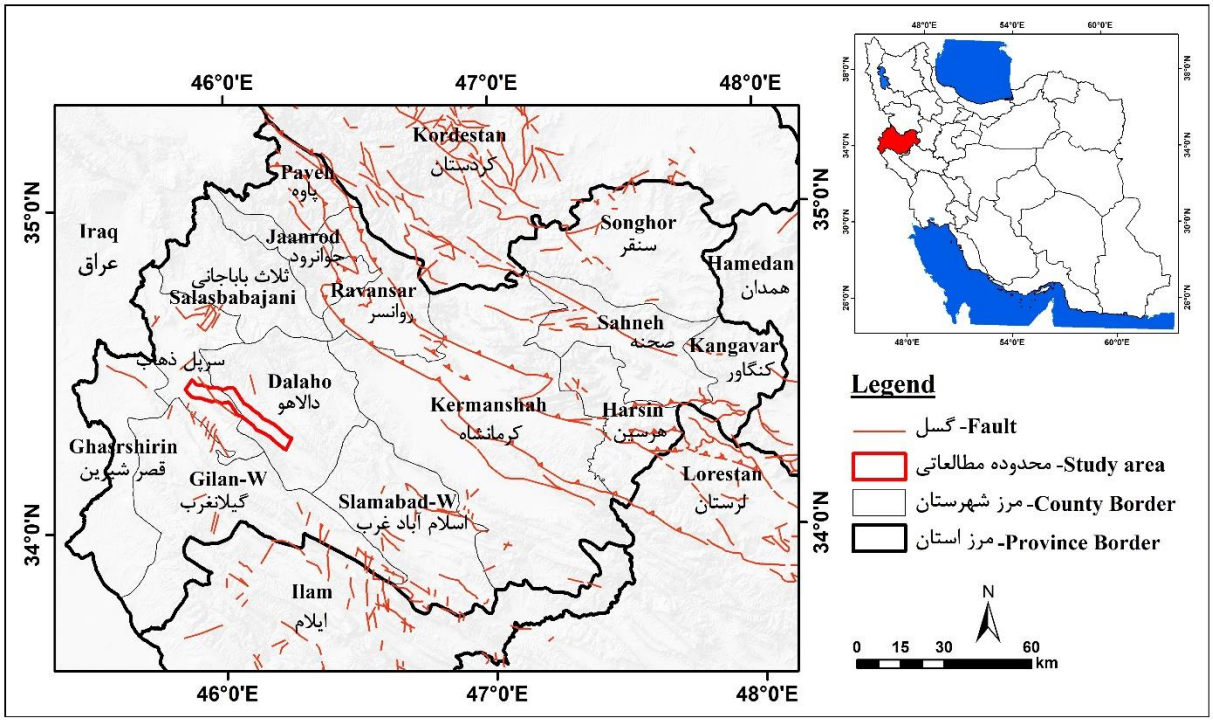
نتایج این تحقیق بیانگر کاربرد مدلسازی LSZ بر مبنای پارامترهای محیطی در شناسایی مناطق آسیب‌پذیر است. کسانتینی و همکاران (Ksantini et al., 2025) به تحلیل کاربرد مدلسازی‌های مختلف در شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در تونس پرداختند. نتایج این تحقیق بیانگر دقت بالای روش SFL-AHP بوده است. کیانی و همکاران (Kiani, Karimkhani & Mazidi, 2021) با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک و آنفیس به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز هشتجین استان اردبیل پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داده است که حدود ۷ درصد از این حوضه، پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین‌لغزش دارد. بهاروند (Baharvand, 2023) با استفاده از مدل نسبت فراوانی و منطق فازی، به ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در آزادراه خرم‌آباد - اراک پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داده است که حدود ۲۸ درصد از منطقه، در معرض مخاطره زمین‌لغزش قرار دارند. پیره و گنجائیان (Pireh & Ganjaeian, 2024) به تحلیل زمین‌لغزش‌های رخ داده شهرستان سنندج در ارتباط با عوامل محیطی پرداختند. نتایج این تحقیق بیانگر پتانسیل بالایی مناطق جنوبی شهرستان سنندج از نظر وقوع زمین لغزش است. معاوی و همکاران (Moavi, Elmizadeh & Entezari, 2025) به مدلسازی حساست زمین‌لغزش در حوضهٔ آبریز سد شهید عباس‌پور با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داده است که مناطق جنوب غربی و شمالی حوضه، پتانسیل آسیب‌پذیری بیش‌تری دارند.

بررسی تحقیقات پیشین نشان داده است که با وجود این مطالعات، هنوز بررسی تأثیر هم‌زمان شرایط تکتونیکی فعال و زمین‌لرزه‌های اخیر بر ناپایداری دامنه‌ها، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. بیان مسئله این پژوهش آن است که در مسیر ارتباطی کرند – سرپل‌ذهاب، علاوه بر عوامل محیطی و انسانی، وقوع زمین‌لرزه ازگله به‌عنوان یک عامل تشدیدکننده، سبب افزایش آسیب‌پذیری دامنه‌ها شده و ضرورت شناسایی دقیق مناطق مستعد لغزش را دوچندان می‌کند.

ضرورت این تحقیق از دو جنبهٔ علمی و کاربردی قابل تبیین است. از دیدگاه علمی، این پژوهش با تمرکز بر تأثیر عوامل تکتونیکی و زمین‌لرزه‌های اخیر، خلأ موجود در ادبیات نظری را پر می‌کند. از منظر کاربردی، شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در مسیر ارتباطی کرند – سرپل‌ذهاب می‌تواند به برنامه‌ریزان، مهندسان راه و مدیران بحران کمک کند تا اقدامات پیشگیرانه مؤثرتری اتخاذ کنند. این موضوع به‌ویژه در این مسیر که یکی از شریان‌های حیاتی استان کرمانشاه محسوب می‌شود، دارای اهمیت حیاتی است. در راستای این ضرورت، هدف اصلی تحقیق حاضر، شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در محور کرند – سرپل‌ذهاب با تأکید بر عوامل تکتونیکی و اثرات زمین‌لرزه ۱۳۹۶ ازگله است. نوآوری تحقیق نیز در تحلیل نقش زمین‌لرزه به‌عنوان عامل پنهان در تحریک لغزش‌ها و شناسایی دامنه‌های در معرض خطر نهفته است.

منطقهٔ مورد مطالعه

در این پژوهش مسیر ارتباطی شهر کرند تا شهر سرپل‌ذهاب به طول ۴۴ کیلومتر، به‌عنوان محدوده مطالعاتی انتخاب شده است و برای این منظور، حریم ۲ کیلومتری از مسیر در نظر گرفته شده است (شکل ۱). حریم ۲ کیلومتری بر مبنای هدف تحقیق و همچنین وضعیت توپوگرافی منطقه انتخاب شده است. محدودهٔ مطالعاتی از نظر تقسیمات مورفوتکتونیکی در واحد زاگرس قرار دارد و از نظر لیتولوژی بخش زیادی از وسعت آن را توده‌های آهکی مربوط با سازندهای آسماری و بنگستان دربرگرفته است. همچنین به دلیل نزدیکی به گسل اصلی زاگرس، دارای پتانسیل لرزه‌خیزی بالای است (Ganjaeian, Yamani, Goorabi & Maghsoudi, 2023). این محدوده از نظر ارتفاعی در بین ارتفاع ۵۴۰ تا ۲۰۴۵ متری از سطح دریا قرار دارد و از نظر ژئومورفولوژی، بخش زیادی از آن را واحد کوهستان دربرگرفته است و به همین دلیل دامنه‌های پرشیب بخش زیادی از منطقه را شامل می‌شوند. همچنین از نظر اقلیمی نیز این منطقه با میانگین بارش حدود ۳۵۰ میلیمتر، دارای زمستان‌های معتدل و تابستان‌های گرم و خشک است (Kermanshah Provincial Meteorological Organization, 2025).



شکل ۱– نقشهٔ موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه

Fig. 1. Location map of the study area

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از تصاویر راداری Sentinel 1 مربوط به قبل ۲۰۱۷/۱۱/۰۷ و بعد از زمین لرزه ازگله ۲۰۱۷/۱۱/۱۹، تصاویر ماهواره MODIS مربوط به سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴، لایه رقومی نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شیت‌های کرند و سرپل‌ذهاب و مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR به‌عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای تحقیق، GMTSAR (V.6.0) (اجرای روش تداخل سنجی رادای) و ArcGIS (استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی و تهیه نقشه‌های مورد نظر) بوده است. این تحقیق در چند مرحله انجام شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:

مرحلهٔ اول (شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش): در این مرحله به‌منظور شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در محدوده مطالعاتی، از ۸ پارامتر فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، ارتفاع، شیب، جهت شیب، لیتولوژی، فاصله از گسل و پوشش‌گیاهی استفاده شده است (جدول ۱). انتخاب پارامترها بر مبنای وضعیت محیطی، نظرات کارشناسان و مطالعات پیشین بوده است و دلیل عدم استفاده از پارامترهایی مانند بارش، اختلاف کم میانگین بارش در محدودهٔ مطالعاتی بوده است. همچنین به دلیل استفاده از پارامتر تراکم پوشش‌گیاهی، از پارامتر کاربری اراضی نیز استفاده نشده است.

پس از تهیهٔ لایه‌های اطلاعاتی مربوط به پارامترها، به‌منظور قابل ارزیابی کردن لایه‌های اطلاعاتی، به لایه‌های اطلاعاتی ارزش دورن لایه‌ای بین صفر تا ۱ داده است (لایه‌های اطلاعاتی استانداردسازی شده‌اند). مناطقی که دارای ارزش ۱ هستند، پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین‌لغزش دارند و مناطقی که دارای ارزش صفر هستند، پتانسیل کمی از نظر وقوع زمین‌لغزش دارند (جدول ۲).

جدول ۱- نحوهٔ تهیه لایه‌های اطلاعاتی

Table 1- Preparation of the spatial data layers

ردیف Row	پارامتر Parameter	نحوه تهیه لایه اطلاعاتی How to prepare an information layer
1	فاصله از جاده Distance from road	تهیه شده بر اساس تصاویر گوگل ارث Prepared based on Google Earth images.
2	فاصله از رودخانه Distance from river	تهیه شده بر اساس مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR Prepared based on the 12.5 m high digital model ALOS PALSAR
3	ارتفاع Elevation	تهیه شده بر اساس مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR Prepared based on the 12.5 m high digital model ALOS PALSAR
4	شیب Slope	تهیه شده بر اساس مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR Prepared based on the 12.5 m high digital model ALOS PALSAR
5	جهت شیب Aspect	تهیه شده بر اساس مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR Prepared based on the 12.5 m high digital model ALOS PALSAR
6	لیتولوژی Lithology	تهیه شده بر اساس لایه رقومی نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شیت‌های کرند و سرپل‌ذهاب Prepared based on the digital layer of 1:100,000 geological maps of Kerand and Sarpolzahab sheets.
7	فاصله از گسل Distance from fault	تهیه شده بر اساس لایه رقومی نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شیت‌های کرند و سرپل‌ذهاب Prepared based on the digital layer of 1:100,000 geological maps of Kerand and Sarpolzahab sheets.
8	تراکم پوشش‌گیاهی Vegetation density	تهیه شده با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین و تصاویر MODIS Prepared using Google Earth Engine and MODIS images.

پس از استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی، با استفاده از نظرات کارشناسان (۱۰ کارشناس ژئومورفولوژی) و روش ضریب وزنی نسبی (Ganjaeian, Shahjamali, Ebrahimi & Akbarian, 2025)، به لایه‌های اطلاعاتی وزن داده شده است. در این روش، تمامی معیارها با هم مقایسه شده است و وزن نهایی بر مبنای تعداد اولویت هر پارامتر نسبت به پارامترهای دیگر سنجیده شده است. به‌طور مثال برای شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش، پارامتر شیب از تمامی پارامترها مهم‌تر است، بنابراین وزن ۱/۶ را گرفته است. یعنی چون از ۶ پارامتر مهم است، به ازای هر پارامتر، ۰/۱ به ضریب آن اضافه شده است. بر این اساس، در این روش، به ازای هر بار ارجحیت نسبت به پارامترهای دیگر، ضریب ۰/۱ به وزن آن پارامتر اضافه خواهد شد. پس از وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی و اعمال وزن‌ها، مقادیر عضویت فازی μi(x) به‌دست آمدند. سپس لایه‌ها با استفاده از عملگر گامای فازی به‌صورت رابطه (۱) ترکیب شدند و نقشه نهایی مناطق مستعد زمین‌لغزش حاصل گردید (Klai, Haddad, Bouzid & Rabia, 2020):

$$((\mu i(x)-1)i=1\prod n-1)\gamma-1\cdot(\mu i(x)i=1\prod n)\gamma=\mu\gamma(x)$$

رابطه ۱: گامای فازی

در این رابطه، μi(x) مقدار عضویت (فازی) لایه i در مکان x است. n تعداد لایه‌های اطلاعاتی است و γ پارامتر گاما در بازه {۰ تا ۱} است.

جدول ۲- نحوهٔ استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی

Table 2- Standardization procedure of the Spatial date layers

ردیف Row	پارامتر Parameter	نحوهٔ استانداردسازی لایهٔ اطلاعاتی How to standardize the information layer	الگو Pattern
1	فاصله از جاده Distance from road	به مناطق نزدیک جاده، ارزش نزدیک ۱ داده شده و به مناطق دورتر، ارزش نزدیک صفر داده شده است. Areas near the road are assigned a value close to 1, and areas farther away are assigned a value close to 0.	خطی معکوس Inverse linear
2	فاصله از رودخانه Distance from river	به مناطق نزدیک رودخانه، ارزش نزدیک ۱ داده شده و به مناطق دورتر، ارزش نزدیک صفر داده شده است. Areas near the river are assigned a value close to 1, and areas farther away are assigned a value close to 0.	خطی معکوس Inverse linear
3	ارتفاع Elevation	به مناطق دارای ارتفاع بیش‌تر، ارزش نزدیک ۱ داده شده و به مناطق کم ارتفاع، ارزش نزدیک صفر داده شده است. Areas with higher elevation are assigned a value close to 1, while areas with lower elevation are assigned a value close to 0.	خطی مستقیم Straight linear
4	شیب Slope	به مناطق دارای شیب بیش‌تر، ارزش نزدیک ۱ داده شده و به مناطق کم شیب، ارزش نزدیک صفر داده شده است. Areas with steeper slopes are assigned a value close to 1, while areas with gentler slopes are assigned a value close to 0.	خطی مستقیم Straight linear
5	جهت شیب Aspect	به جهات شیب شمالی ارزش نزدیک ۱ و به جهات شیب جنوبی، ارزش نزدیک صفر داده شده است. North-slope directions are given a value close to 1 and south-slope directions are given a value close to 0 .	غیرخطی Nonlinear
6	لیتولوژی Lithology	به مناطق دارای مواد آبرفتی، ارزش نزدیک ۱ و به مناطق دارای لیتولوژی آهکی، ارزش نزدیک صفر داده شده است. Areas with alluvial materials are assigned a value close to 1, while areas with limestone lithology are assigned a value close to 0.	غیرخطی Nonlinear
7	فاصله از گسل Distance from fault	به مناطق نزدیک گسل، ارزش نزدیک ۱ داده شده و به مناطق دورتر، ارزش نزدیک صفر داده شده است. Areas near the fault are assigned a value close to 1, and areas farther away are assigned a value close to 0.	خطی معکوس Inverse linear
8	تراکم پوشش‌گیاهی Vegetation density	به مناطق دارای تراکم پوشش‌گیاهی کم‌تر، ارزش نزدیک ۱ داده شده و به مناطق با تراکم پوشش‌گیاهی بیش‌تر، ارزش نزدیک صفر داده شده است. Areas with lower vegetation density are assigned a value close to 1, and areas with higher vegetation density are assigned a value close to 0.	خطی معکوس Inverse linear

مرحلهٔ دوم (ارزیابی اثرات زمین‌لرزه ازگله بر محدودهٔ مطالعاتی): زمین‌لرزه ازگله به بزرگی ۷/۳ ریشتر و عمق ۳۲ کیلومتری از سطح زمین، در ۲۱ آبان سال ۱۳۹۶ در نزدیکی شهر ازگله در شهرستان تازه آباد استان کرمانشاه رخ داد. در این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیرات زمین‌لرزه ازگله در سال ۱۳۹۶، از روش تداخل‌سنجی راداری تفاضلی[1] استفاده شده است و با استفاده از این روش، میزان تغییرات سطح زمین ارزیابی شده است. به‌منظور ارزیابی میزان تغییرات صورت گرفته، از تصاویر راداری سنتینل ۱ قبل و بعد از وقوع زمین‌لرزه استفاده شده است (جدول ۳). پس از تهیهٔ تصاویر مورد نظر، ابتدا پیش‌پردازش‌های لازم بر روی تصاویر انجام شده است و سپس نقشهٔ میزان جابه‌جایی عمودی منطقه در طی دوره زمانی ۱۲ روزه قبل و بعد از زمین‌لرزه ازگله تهیه شده است و به این صورت مناطقی که دارای بالاترین تغییرات بوده‌اند، شناسایی شده است.

1- Differential InSAR, DInSAR

جدول ۳- مشخصات تصاویر مورد استفاده
Table 3- Specifications of the utilized images

Date	Type	Orbital mode	Polarization	Baseline
2017/11/07	SLC	Descending	VV	۰
2017/11/19	SLC	Descending	VV	14/2

مرحلهٔ سوم (شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش با در نظر گرفتن تأثیرات زمین‌لرزه ازگله): پس از تهیهٔ نقشهٔ میزان جابه‌جایی عمودی و مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه، در این بخش مناطقی که هم دارای بالاترین جابه‌جایی عمودی بوده‌اند و هم اینکه در طبقه دارای آسیب‌پذیری بالا در برابر زمین‌لغزش بوده‌اند، شناسایی شده است و به‌عنوان مناطق در معرض مخاطره زمین‌لغزش معرفی شده‌اند.

بحث و نتایج

شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش

الف) تشریح پارامترهای مورد استفاده و استانداردسازی آن‌ها

فاصله از رودخانه و جاده: رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش محسوب می‌شوند. رودخانه‌ها به دلیل نقش مهمی که در زیربری و فرسایش پای دامنه‌ها دارند، زمینه را برای وقوع زمین‌لغزش فراهم می‌کنند. بررسی وضعیت رودخانه‌های محدودهٔ مطالعاتی بیانگر این است که این رودخانه‌ها فصلی هستند و در بخش زیادی از محدوده، به موازات جاده اصلی، جریان دارند. همچنین توسعه خطوط ارتباطی به‌عنوان مهم‌ترین فعالیت‌های انسانی مؤثر در وقوع حرکات دامنه محسوب می‌شود. با توجه به اینکه توسعهٔ خطوط ارتباطی در مناطق کوهستانی با تخریب پای دامنه‌ها همراه است، بنابراین خطوط ارتباطی زمینه را برای وقوع زمین لغزش فراهم می‌آورد (Kiani et al., 2021).

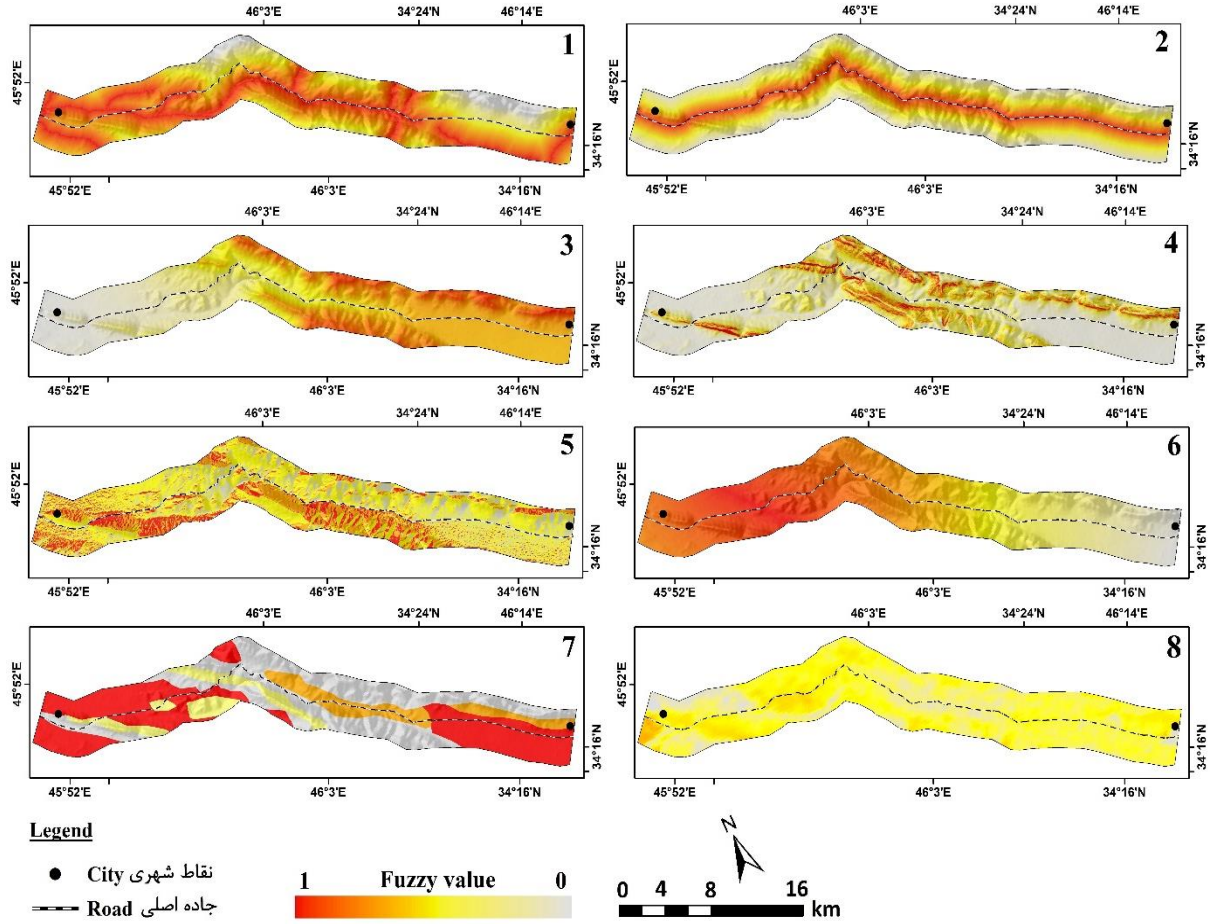
شیب، جهت شیب و ارتفاع: شیب به‌عنوان مهم‌ترین عامل در وقوع حرکات دامنه محسوب می‌شود. مناطق با شیب زیاد به دلیل ناپایداری دامنه‌ای، در معرض حرکات دامنه‌ای از جمله زمین‌لغزش هستند (Baharvand, 2023). با توجه به کوهستانی بودن منطقه، بخش زیادی از منطقه را دامنه‌ها با شیب زیاد در بر گرفته است و به همین دلیل بخش زیادی از منطقه، مستعد وقوع زمین‌لغزش است . جهت شیب نیز به دلیل تأثیر مستقیمی که بر میزان رطوبت، تراکم پوشش‌گیاهی تبخیر و نفوذ دارد، از جمله عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش محسوب می‌شوند. به‌طور معمول، جهات شیب شمالی به دلیل رطوبت و یخبندان بیش‌تری که دارند، پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین‌لغزش دارند. همچنین، ارتفاع از دیگر عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش است. مناطق مرتفع دارای رطوبت و یخبندان بیش‌تری هستند، بنابراین این مناطق پتانسیل بالاتری از نظر وقوع مخاطره زمین‌لغزش دارد (Ganjaeian, Nosrati, Ebrahimi & Ghisarian, 2025). بررسی وضعیت ارتفاعی محدودهٔ مورد مطالعه بیانگر این است که این محدوده بین ارتفاع ۵۴۰ تا ۲۰۴۵ متری از سطح دریا قرار دارد و در یک روند کلی، میزان ارتفاع در مناطق مرکزی محدوده بیش‌تر است. اختلاف ارتفاع زیاد محدوده، سبب تنوع در وضعیت هیدرواقلیمی و پوشش‌گیاهی منطقه شده است.

لیتولوژی و فاصله از گسل: پارامترهای زمین‌شناسی نیز نقش مهمی در وقوع زمین‌لغزش دارند. لیتولوژی و فاصله از گسل به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای زمین‌شناسی مؤثر در وقوع زمین‌لغزش محسوب می‌شود. نوع لیتولوژی و میزان مقاومتی که در برابر حرکت دارد، نقش تعیین‌کننده‌ای در وقوع زمین‌لغزش دارد. بر این اساس، مناطقی که دارای لیتولوژی سست هستند، در معرض مخاطره زمین‌لغزش قرار دارند. همچنین خطوط گسلی نیز به دلیل اینکه نقش مهمی در گسترش درز و شکاف‌ها دارند، زمینه را برای بروز مخاطره زمین‌لغزش فراهم می‌آورند (Moavi et al., 2025). بررسی وضعیت لیتولوژی محدودهٔ مورد مطالعه، بیانگر این است که بخش زیادی از این محدوده را سازندهای آهکی گروه بنگستان و آسماری دربرگرفته است و بخش‌های کم ارتفاع محدوده نیز توسط

ماسه‌سنگ، کنگلومرا و موادآبرفتی پوشیده شده است. همچنین از نظر تراکم خطوط گسلی نیز، بخش‌های غربی محدوده دارای تراکم بیشتری هستند.

تراکم پوشش‌گیاهی: پوشش‌گیاهی نیز از دیگر عوامل مؤثر در تعیین پتانسیل وقوع زمین‌لغزش محسوب می‌شود. به‌طور معمول، مناطقی که دارای پوشش‌گیاهی کمتری هستند، پتانسیل بیش‌تری از نظر وقوع زمین‌لغزش دارند (Pireh & Ganjaeian, 2024). نتایج بررسی وضعیت تراکم پوشش‌گیاهی منطقهٔ مورد مطالعه، نشان داده است که بالاترین تراکم پوشش‌گیاهی مربوط به مناطق کم ارتفاع و منطبق بر موادآبرفتی است.

با توجه به موارد ذکر شده، پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی، به منظور استانداردسازی آن‌ها، به مناطق نزدیک رودخانه و جاده، مناطق دارای ارتفاع و شیب زیاد، جهات شیب شمالی، مناطق دارای لیتولوژی مواد آبرفتی و مناطق نزدیک خطوط گسل، ارزش نزدیک یک داده شده است. همچنین به مناطق دور از رودخانه و جاده، مناطق دارای ارتفاع و شیب کم، جهات شیب جنوبی، مناطق دارای لیتولوژی آهکی و مناطق دور از خطوط گسل، ارزش نزدیک صفر داده شده است (شکل ۲).



شکل ۲- نقشهٔ استانداردسازی شده لایه‌های اطلاعاتی ۱- فاصله از رودخانه ۲- فاصله از جاده ۳- ارتفاع ۴- شیب ۵- جهت شیب ۶- فاصله از گسل ۷- لیتولوژی، ۸- تراکم پوشش‌گیاهی

Fig. 2. Standardized map of the spatial data layers: 1-Distance from river 2-Distance from road 3-Elevation 4-Slope 5-Aspect 6-Distance from fault 7-Lithology 8- Vegetation cover density

ب) وزن‌دهی به پارامترها

پس از استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی، با استفاده از روش ضریب وزنی نسبی و بر مبنای نظرات کارشناسان (۱۰ کارشناس ژئومورفولوژی)، به لایه‌های اطلاعاتی وزن داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، پارامترهای شیب، فاصله از جاده و فاصله از رودخانه به ترتیب با ضریب ۱/۷، ۱/۶ و ۱/۵، دارای بالاترین ضریب هستند و بالاترین تأثیرگذاری را دارند (جدول ۴).

جدول ۴- وزن نهایی پارامترها

Table 4- Final weights of the parameters

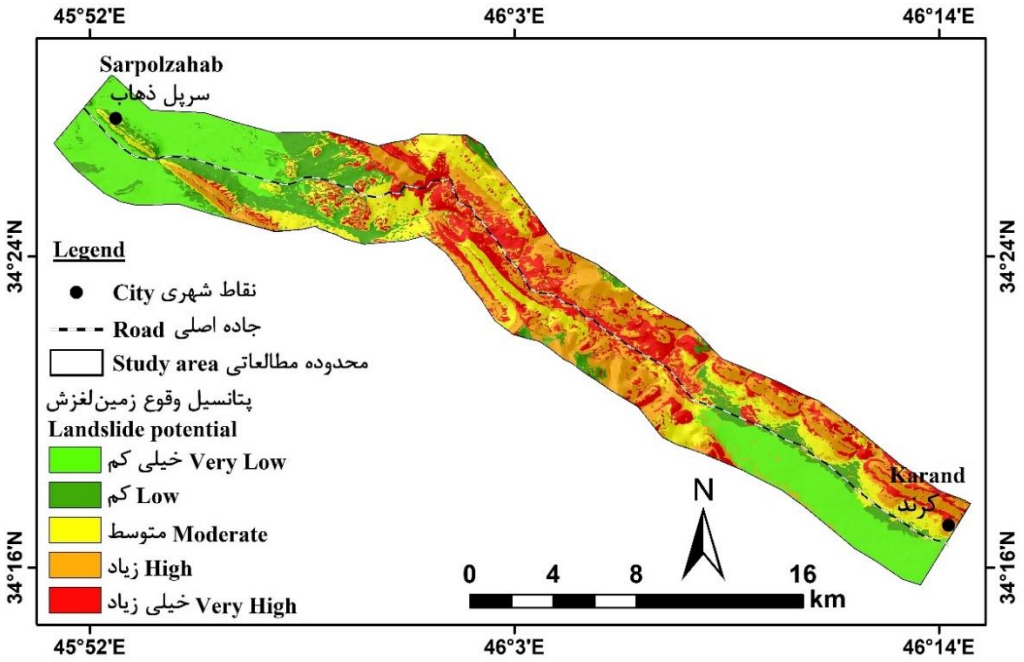
ردیف Row	پارامتر Parameter	ارجعیت نسبت به پارامترهای دیگر Value relative to other parameters	وزن نهایی Point
1	شیب Slope	فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، لیتولوژی، پوشش‌گیاهی، ارتفاع، جهت شیب و فاصله از گسل Dis. Road, Dis. River, Lithology, V. Density, Elevation, Aspect, Dis. Fault	1/7
2	فاصله از جاده Dis. Road	فاصله از رودخانه، لیتولوژی، پوشش‌گیاهی، ارتفاع، جهت شیب و فاصله از گسل Dis. River, Lithology, V. Density, Elevation, Aspect, Dis. Fault	1/6
3	فاصله از رودخانه Dis. River	لیتولوژی، پوشش‌گیاهی، ارتفاع، جهت شیب و فاصله از گسل Lithology, V. Density, Elevation, Aspect, Dis. Fault	1/5
4	لیتولوژی Lithology	پوشش‌گیاهی، ارتفاع، جهت شیب و فاصله از گسل V. Density, Elevation, Aspect, Dis. Fault	1/4
5	تراکم پوشش‌گیاهی V. Density	ارتفاع، جهت شیب و فاصله از گسل Elevation, Aspect, Dis. Fault	1/3
6	ارتفاع Elevation	جهت شیب و فاصله از گسل Aspect, Dis. Faul	1/2
7	جهت شیب Aspect	فاصله از گسل Dis. Fault	1/1
8	فاصله از گسل Dis. Fault	-	1

ج) اجرای مدل گامای فازی

پس از وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی، وزن به‌دست آمده بر روی هر لایه اعمال شده است و سپس لایه‌های با استفاده از عملگر گامای فازی با هم ترکیب شده و سپس نقشهٔ نهایی مناطق مستعد مستعد وقوع زمین‌لغزش منطقهٔ مورد مطالعه در ۵ کلاس تهیه شده است (شکل ۳). بر اساس نتایج به‌دست آمده، مناطق میانی مسیر ارتباطی کرند تا سرپل‌ذهاب به دلیل ارتفاع و شیب زیاد و نوع لیتولوژی، پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین‌لغزش دارد.

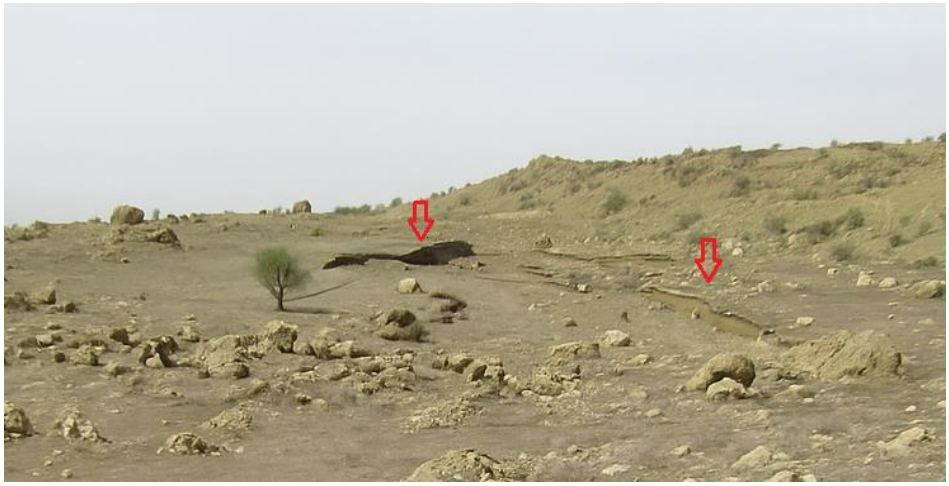
ارزیابی اثرات زمین‌لرزه ازگله بر محدودهٔ مطالعاتی

موقعیت زمین‌ساختی زاگرس سبب شده است تا این واحد دارای پتانسیل لرزه‌خیزی بالایی باشد (Ganjaeian, 2025). زمین‌لرزه‌ها با اثرات زیادی بر سطح زمین همراه هستند. یکی از مهم‌ترین اثرات زمین‌لرزه‌ها، جابه‌جایی سطح زمین است. جابه‌جایی‌های ناشی از زمین‌لرزه محسوس نیستند و بیانگر میزان انرژی آزاد شده هستند. از جمله زمین‌لرزه‌هایی که باعث جابه‌جایی و تغییرات زیادی در سطح زمین شد، زمین‌لرزه ازگله در سال ۱۳۹۶ بوده است. تحت تأثیر این زمین‌لرزه، مناطق مجاور آن با جابه‌جایی زیادی مواجه شده است. بخش زیادی از این جابه‌جایی رخ داده مربوط به دامنه‌هایی بوده است که پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین لغزش دارند، بنابراین می‌توان گفت که زمین‌لرزه رخ داده یا به‌طور مستقیم باعث حرکات دامنه‌ای شده است و یا اینکه زمینه را برای بروز مخاطرات دامنه‌ای از جمله زمین‌لغزش فراهم آورده است (شکل ۴). با توجه به اهمیت موضوع در این بخش به بررسی میزان جابه‌جایی عمودی ناشی از زمین لرزه ازگله در سال ۱۳۹۶ پرداخته شده است.



شکل ۳- نقشهٔ نهایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در منطقهٔ مورد مطالعه

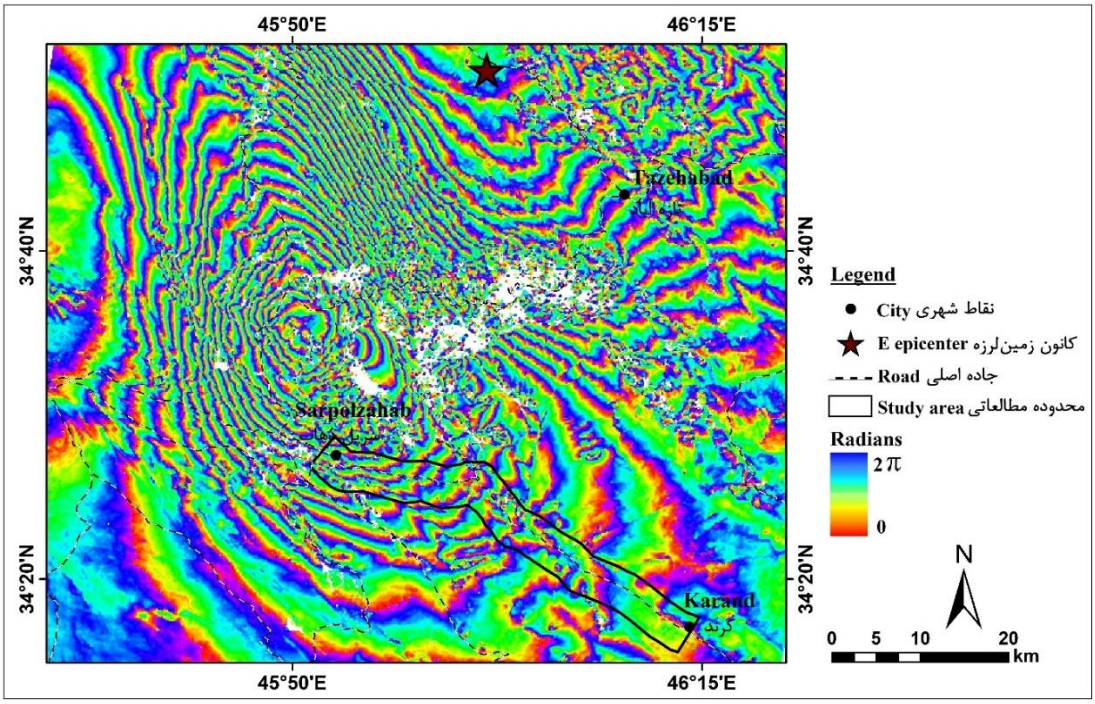
Fig. 3. Final map of landslide prone areas in the study area



شکل ۴- تصویری از اثرات زمین‌لرزه ازگله بر دامنه‌های منطقه

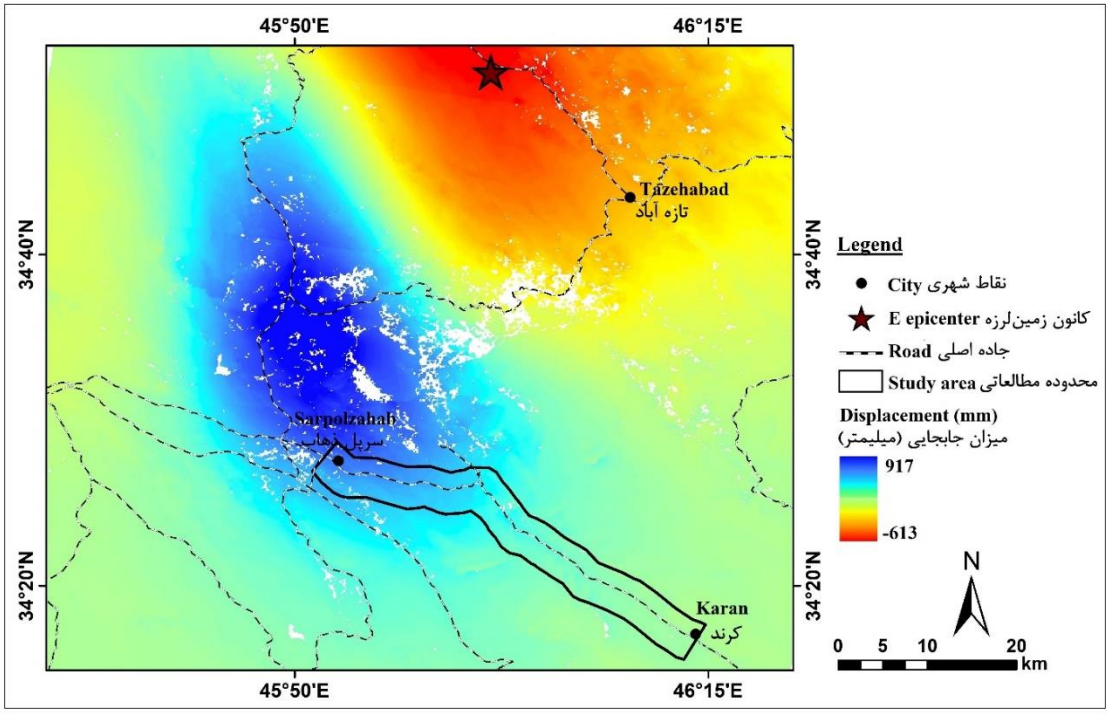
Fig. 4. Image showing the effects of the Ezgeleh earthquake on the region's slopes

در این تحقیق، به‌منظور تهیهٔ نقشه میزان جابه‌جایی عمودی منطقه، از تصاویر سنتینل ۱ قبل و بعد از وقوع زمین‌لرزه استفاده شده است. برای این منظور، پس از انجام پیش‌پردازش‌های لازم، ابتدا نقشهٔ اینترفروگرام منطقه تهیه شده است (شکل ۵). پس از تهیهٔ نقشه اینترفروگرام، نقشهٔ جابه‌جایی عمودی منطقه تهیه شده است (شکل ۶). بر اساس نقشهٔ تهیه شده، تحت تأثیر زمین‌لرزه ازگله، منطقهٔ مورد مطالعه بین ۹۱۷ تا ۶۱۳- میلیمتر جابه‌جایی داشته است. آنالیز جابه‌جایی رخ داده بیانگر این است که تحت تأثیر زمین‌لرزه رخ داده، مناطق جنوبی محدوده، منطبق بر مناطق حاشیه شهر سرپل‌ذهاب با بالاآمدگی و مناطق شمالی محدوده با پایین‌رفتگی مواجه شده است. جابه‌جایی رخ داده بیانگر انرژی زیاد آزاد شده ناشی از زمین‌لرزه ازگله بوده است که این مسئله می‌تواند نقش مهمی بر ناپایداری‌های دامنه منطقه داشته باشد.



شکل ۵- نقشهٔ اینترفروگرام منطقه

Fig. 5. Interferogram map of the area

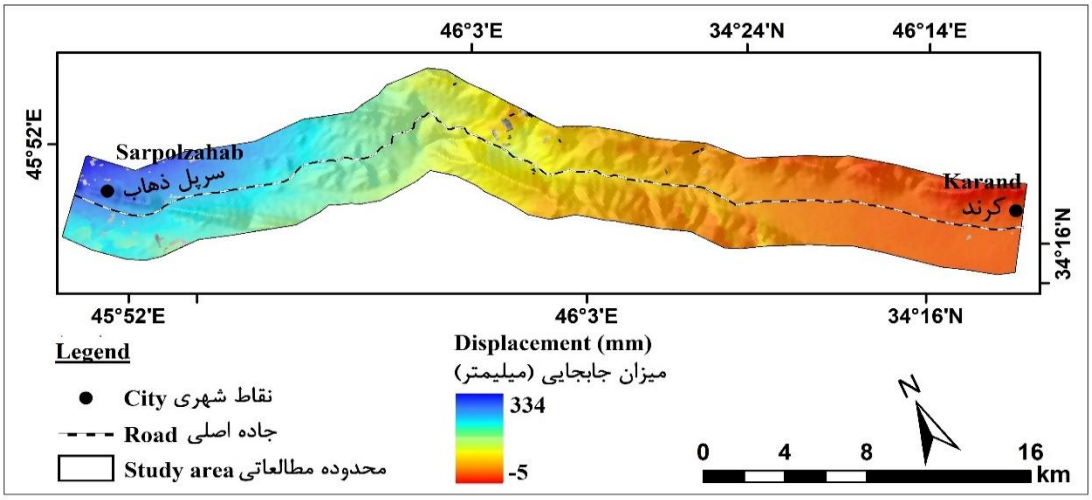


شکل ۶- نقشهٔ میزان جابه‌جایی عمودی منطقه

Fig. 6. Map of the vertical displacement of the area

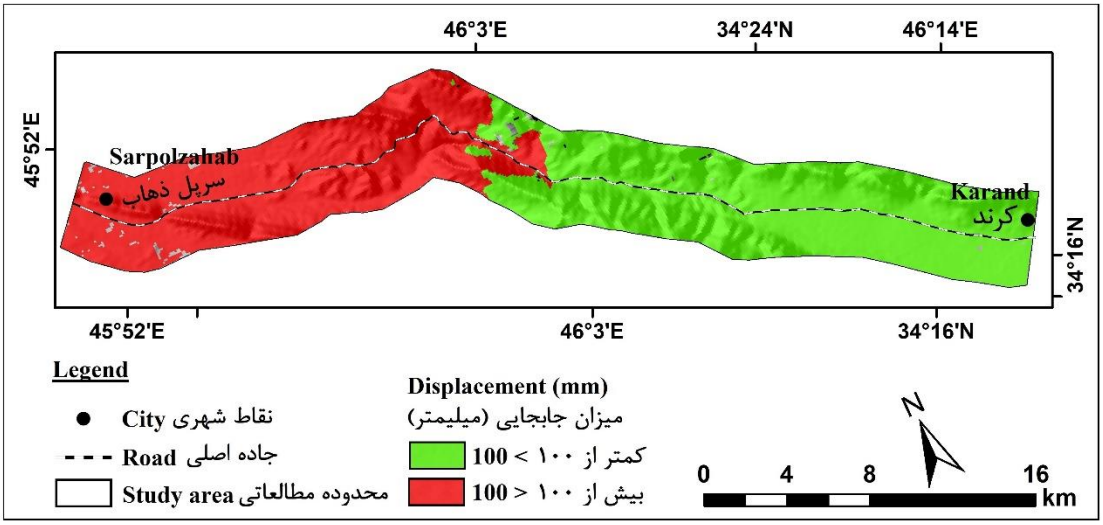
شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش با در نظر گرفتن تأثیرات زمین‌لرزه ازگله

نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان داده است که زمین‌لرزه ازگله باعث بروز تغییرات محسوس و نامحسوس زیادی در منطقه شده است. از جمله تأثیرات نامحسوس این زمین‌لرزه، جابه‌جایی عمودی قابل توجه این زمین‌لرزه بوده است به‌طوری‌که جابه‌جایی عمودی ناشی از زمین لرزه ترکمانچای در سال ۱۳۹۸، ماکزیمم ۹۶ میلیمتر بوده است (Negahban, Ganjaeian, Saeedi & Ghasemi, 2020) در حالی که ماکزیمم جابه‌جایی ناشی از زمین لرزه ازگله ۹۱۷ میلیمتر بوده است. با توجه به اینکه جابه‌جایی رخ داده می‌تواند نقش مهمی در ناپایداری دامنه‌ها و آماده حرکت کردن آن‌ها داشته باشد، در این بخش ابتدا نقشهٔ میزان جابه‌جایی عمودی منطقه در محدودهٔ مطالعاتی تهیه شده است (شکل ۷) که بر اساس آن، محدودهٔ مطالعاتی بین ۵- تا ۳۳۴ میلی‌متر جابه‌جایی داشته است. در ادامه، مناطقی که دارای بیشترین تغییرات بوده‌اند شناسایی شده است که برای این منظور مناطق دارای بیش از ۱۰۰ میلی‌متر جابه‌جایی، به‌عنوان مناطق ناپایداری در نظرگرفته شده است (شکل ۸).



شکل ۷- نقشهٔ میزان جابه‌جایی عمودی محدودهٔ مطالعاتی تحت تأثیر زمین‌لرزه ازگله

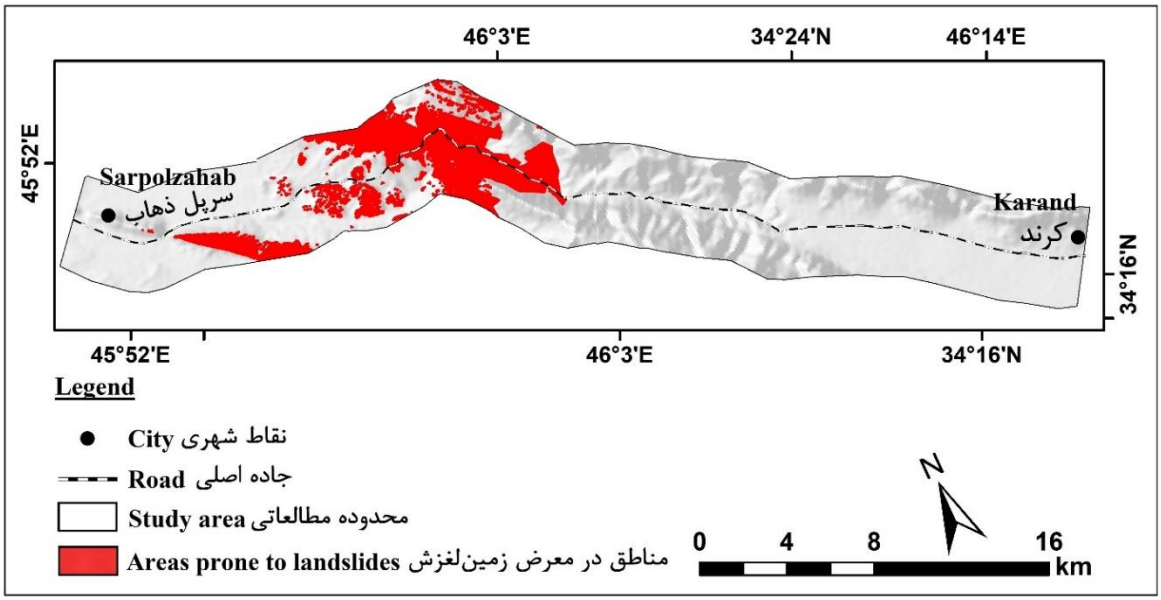
Fig.7. Map of vertical displacement of the study area affected by the Ezgeleh earthquake



شکل ۸- نقشهٔ طبقه‌بندی شده جابه‌جایی عمودی محدودهٔ مطالعاتی تحت تأثیر زمین‌لرزه ازگله

Fig. 8. Classified map of vertical displacement of the study area affected by the Ezgeleh earthquake

پس از تهیهٔ نقشهٔ طبقه‌بندی شده جابه‌جایی عمودی محدودهٔ مطالعاتی، نقشهٔ طبقات با پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد که دارای جابه‌جایی عمودی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر بوده است تهیه شده است (شکل ۹). بر اساس نتایج حاصله، دامنه‌های میانی منطقه و مناطق نزدیک شهر سرپل‌ذهاب به دلیل اینکه هم از نظر پارامترهای محیطی مستعد وقوع زمین‌لغزش هستند و هم اینکه دارای جابه‌جایی عمودی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر بوده‌اند، به‌عنوان مناطق در معرض مخاطره زمین‌لغزش شناسایی شده است.



شکل ۹- نقشهٔ مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش با در نظر گرفتن تأثیرات زمین‌لرزه ازگله

Fig. 9. Map of landslide prone areas considering the effects of the Ezgeleh earthquake

نتیجه‌گیری

بررسی انجام‌شده در این پژوهش نشان داد که به‌کارگیری روش گامای فازی در ترکیب لایه‌های اطلاعاتی محیطی همچون شیب، لیتولوژی و ارتفاع، ابزاری کارآمد برای شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش است. نتایج حاصل بیانگر آن است که بخش‌های میانی مسیر ارتباطی کرند تا سرپل‌ذهاب همانند مناطق جنوب غربی حوضه آبریز سد شهید عباس‌پور (Moavi et al., 2025)، به‌دلیل شرایط خاص زمین‌شناسی و مورفولوژیکی، پتانسیل بالاتری در وقوع زمین‌لغزش دارند. از سوی دیگر، تحلیل اثرات زمین‌لرزه ازگله سال ۱۳۹۶ نشان داد که این زلزله نه تنها موجب جابه‌جایی محسوس سطح زمین شد، بلکه با ایجاد تغییرات عمودی قابل توجه (حداکثر ۹۱۷ میلی‌متر) زمینهٔ ناپایداری دامنه‌ها را نیز تشدید کرده است. مقایسهٔ میزان جابه‌جایی ناشی از این زلزله با زلزله‌های مشابه همچون زمین‌لرزه ترکمانچای (Negahban et al., 2020) نشان می‌دهد که شدت و پیامدهای آن در منطقه مورد مطالعه بسیار بیشتر بوده است.

نتایج پردازش تصاویر سنتینل-۱ و تهیهٔ نقشه‌های جابه‌جایی عمودی نشان داد که مناطقی با جابه‌جایی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر به‌ویژه در اطراف شهر سرپل‌ذهاب و دامنه‌های میانی، در طبقات خطر بالا و خیلی بالا قرار دارند. این هم‌پوشانی بین عوامل محیطی و تغییرات ناشی از زمین‌لرزه، اهمیت لحاظ کردن اثرات لرزه‌ای در مدل‌های ارزیابی خطر زمین‌لغزش را بیش از پیش آشکار می‌سازد. یافته‌ها تأکید می‌کنند که تلفیق داده‌های سنجش‌ازدور با مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند به‌عنوان روشی نوین و دقیق در مدیریت ریسک حرکات دامنه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

به‌طور کلی، نتایج تحقیق حاضر اهمیت توجه به زمین‌لرزه‌ها را در ارزیابی مخاطرات ژئومورفولوژیکی منطقه‌ای نشان داده و نقشه‌های تهیه‌شده می‌توانند به‌عنوان مرجعی علمی برای برنامه‌ریزان، مدیران شهری و مسئولان مدیریت بحران در کاهش خسارات و افزایش ایمنی مناطق مسکونی و زیرساختی مورد استفاده قرار گیرند.

با توجه به یافته‌های این تحقیق، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با استفاده از سری زمانی بلندمدت داده‌های راداری و تکنیک‌های پیشرفته مانند InSAR زمان‌مند انجام گیرد تا تغییرات تدریجی دامنه‌ها به‌طور پیوسته پایش شود. همچنین استفاده از مدل‌های عددی پویای پایداری شیب، در کنار داده‌های سنجش‌ازدور، می‌تواند دید جامع‌تری از رفتار دامنه‌ها پس از زمین‌لرزه ارائه دهد. توسعهٔ سامانه‌های هشدار سریع زمین‌لغزش بر پایه داده‌های ماهواره‌ای و بومی‌سازی آن‌ها در مناطق پرخطر، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش تلفات انسانی و خسارات اقتصادی داشته باشد. از سوی دیگر، توجه به آموزش جوامع محلی، ارتقای سطح آگاهی عمومی دربارهٔ خطرات زمین‌لغزش و اتخاذ تدابیر مهندسی پایدار برای تثبیت دامنه‌ها، گام‌های مهمی در مدیریت ریسک مخاطرات زمین‌لغزش به شمار می‌آیند.

References

Addis, A. (2023). GIS-Based landslide susceptibility mapping using frequency ratio and Shannon Entropy Models in Dejen District, Northwestern Ethiopia. *Journal of Engineering*, *2023*(1), 1062388. https://doi.org/10.1155/2023/1062388

Adnan, M. S. G., Rahman, M. S., Ahmed, N., Ahmed, B., Rabbi, M. F., & Rahman, R. M. (2020). Improving spatial agreement in machine learning-based landslide susceptibility mapping. *Remote Sensing*, *12*(20), 3347. https://doi.org/10.3390/rs12203347

Asadi, M., Ganjaeian, H., & Javedani, M. (2024). Analysis of Tectonic Status of Lavasan Sub-Basins Using Geomorphic Indicators and Radar Images. *Geography and Environmental Planning*, *35*(1), 73-88. [In Persian] https://doi.org/10.22108/gep.2023.133365.1518

Asmare, D. (2023). Application and validation of AHP and FR methods for landslide susceptibility mapping around choke mountain, northwestern Ethiopia. *Scientific African*, *19*, 398-415. http://dx.doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01470

Baharvand, S. (2023). The Evaluation of Landslide Sensitivity using Frequency Ratio and Fuzzy Logic Models (Case Study: Khorramabad-Arak Freeway). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *12*(1), 103-116. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75264.1201

Ebrahimi, M., Zakerian, A., Dawoudian, J., & Amir-Ahmadi, A. (2018). Stability Analysis and Stabilization Solutions for Landslides (Case Study: Khorramabad-Pole Zaal Freeway). *Geography and Environmental Sustainability*, *7*(4), 1-17. [In Persian] https://ges.razi.ac.ir/article_867.html

Ganjaeian, H. (2025). Evaluating the seismic potential of megacities in Iran. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, *33*(132), 173-188. [In Persian] https://doi.org/10.22131/sepehr.2024.2019284.3047

Ganjaeian, H., Nosrati, M., Ebrahimi, A., & Ghisarian, S. S. (2025a). 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

Ganjaeian, H., Rezaei Arefi, M., Peysoozi, T., & Emami, K. (2021a). Zonning susceptible areas of landslide using WLC and OWA methods -A case study in Mountain cliff Khan, Iran. *Sustainable Earth Trends*, *1*(2), 35-43. https://doi.org/10.52547/sustainearth.1.2.43

Ganjaeian, H., Shahjamali, M., Ebrahimi, A., & Akbarian, M. (2025b). Identifying Areas Prone to Landfill and Waste Depots in Kamyaran County by Implementing Prohibited Areas. *Environment and Interdisciplinary Development*, *10*(87), 1-15. [In Persian] https://doi.org/10.22034/envj.2025.500751.1458

Ganjaeian, H., Yamani, M., Goorabi, A., & Maghsoudi, M. (2020). Analyzing Tangible and Intangible Effects of Kermanshah Ezgeleh Earthquake on Landforms. *Geography and Environmental Sustainability*, *10*(2), 89-103. [In Persian] https://doi.org/10.22126/ges.2020.5571.2274

Ganjaeian, H., Yamani, M., Goorabi, A., & Maghsoudi, M. (2021b). Adaptation of Morphotectonic Indices with Seismic Centers in Zagros Northwest (Sirvan and Qarahsu Basins). *Geography and Environmental Planning*, *31*(4), 113-130. [In Persian] https://doi.org/10.22108/gep.2021.124247.1335

Ganjaeian, H., Yamani, M., Goorabi, A., & Maghsoudi, M. (2023). Estimation of land surface displacement in Kermanshah plain and effect of earthquake Ezgele on displacement process using SBAS method. *Quantitative Geomorphological Research*, *12*(1), 1-13. [In Persian] https://doi.org/10.22034/gmpj.2021.141038

Ganjaeian, H., Yamani, M., Goorabi, M., & Maghsoudi, M. (2024). Evaluating the Impacts of Earthquake in Ezgele, Kermanshah (Iran) (Occurred on 2017/11/12). *Current Research in Environmental Science and Ecology Letters*, *1*(1), 1-10. https://doi.org/10.33140/CRESEL.01.01.06

Jaafari, A. (2024). An Overview of Triggering and Causing Factors of Landslides. In: Chatterjee, U., Lalmalsawmzauva, K., Biswas, B., Pal, S.C. (eds), *Landslides in the Himalayan Region. Disaster Risk Reduction*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4680-4_2

Kermanshah Provincial Meteorological Organization. (2025). http://www.kermanshahmet.ir

Khazaei, J., & Ghaemi, M. (2015). A Comparison and Evaluation of Landslide Stabilization Methods (Case Study: The Landslide Occurred in the 194 km of Malayer - Kermanshah Railway). *Geography and Environmental Sustainability*, *5*(3), 39-53. [In Persian] https://ges.razi.ac.ir/article_380.html

Kiani, S., Karimkhani, A., & Mazidi, A. (2021). Landslide Risk Zoning using Logistic Regression and Anfis Models in Hashtjin Catchment Area in Ardabil Province. *Geography and Environmental Sustainability*, *11*(2), 55-73. [In Persian] https://doi.org/10.22126/ges.2021.6461.2391

Klai, A., Haddad, R., Bouzid, M. K., & Rabia, M. C. (2020). Landslide susceptibility mapping by fuzzy gamma operator and GIS, a case study of a section of the national road n°11 linking Mateur to Béja (Northern Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*, *13*(2). http://dx.doi.org/10.1007/s12517-019-5029-1

Ksantini, F., Sdiri, A., Aydi, A., Almeida-Ñauñay, A. F., Achour, H., & Tarquis, A. M. (2025). A comparative study based on AHP and fuzzy logic approaches for landslide susceptibility zoning using a GIS-based multi-criteria decision analysis. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, *10*(2), 649-668. https://doi.org/10.1007/s41207-024-00552-w

Masruroh, H., Irawan, L. Y., & Anam, C. (2025). Comprehensive spatial analysis landslide susceptibility modelling, spatial cluster analysis and priority zoning for environment analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *22*, 5555–5576. https://doi.org/10.1007/s13762-024-05950-9

Miao, F., Wu, Y., & Xie, Y. (2018). Prediction of landslide displacement with step-like behavior based on multialgorithm optimization and a support vector regression model. *Landslides*, *15*, 475–488. http://dx.doi.org/10.1007/s10346-017-0883-y

Moavi, M., Elmizadeh, H., & Entezari, M. (2025). Modeling Landslide Susceptibility Using Artificial Neural Network Algorithm: A Case Study of Shahid Abbaspour Dam Basin, Northeast Khuzestan. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(3). [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.92634.1557

Mohammahkhan, S., Ganjaeian, H., Shahri, S., & Abbaszade, A. (2019). Predicting the trend of urban development toward hazardous areas using multi temporal images (Case Study: Marivan City). *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, *28*(110), 107-117. [In Persian] https://doi.org/10.22131/sepehr.2019.36615

Negahban, S., Ganjaeian, H., Ebrahimi, A., & Emami, K. (2019). Monitoring and predicting the trend of changes in residential areas using multi-timed images (Case study: Songhor city). *Journal of the Earth and Space Physics*, *45*(2), 343-354. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jesphys.2019.275076.1007084

Negahban, S., Ganjaeian, H., Saeedi, S., & Ghasemi, A. (2020). Study of vertical displacement caused by 2019 Turkmanchay earthquake based on InSAR method. *Journal of the Earth and Space Physics*, *46*(3), 445-456. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jesphys.2020.295046.1007182

Negahban, S., Peysoozi, T., Ganjaeian, H., & Norozi, M. (2021). Identify areas prone to landslide and vertical displacement using Radar images (Case study: Lavasan urban area and urban margin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *10*(3), 1-18. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.71728.1094

Novellino, A., Pennington, C., & Leeming, K. (2024). Mapping landslides from space: A review. *Landslides*, *21*, 1041–1052. https://doi.org/10.1007/s10346-024-02215-x

Pireh, M., & Ganjaeian, H. (2024). Analysis of landslides occurred in connection with environmental factors (Case study: Sanandaj County). *Geography and Human Relationships*, *7*(3), 262-278. [In Persian] https://doi.org/10.22034/gahr.2025.458065.2135

Rezapoor, A., Jabbari, I., & Bahrami, K. (2023). The Impact of Groundwater on the Landslide Occurrence in the Southern Slope of Shah Neshin Mountain. *Physical Geography Research*, *55*(3), 19-36. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2023.364630.1007788

Salari, M., Nayeri, H., Amani, K., & Ganjaeian, H. (2017). Locating Suitable Directions for Kamyaran Urban Development through a Hazardology Approach based on the Application of Geomorphologically Restricted Areas. *Environmental Management Hazards*, *4*(4), 419-436. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jhsci.2018.252694.341

Walker, L. R., & Shiels, A. B. (2013) Physical causes and consequences. in *Landslide Ecology*. Cambridge: Cambridge University Press, pp.46-82. http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511978685

Zhang, W., Wang, W., & Xia, Q. (2012). Landslide risk zoning based on contribution rate weight stack method. *Energy procedia*, *16*, 178-183. http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.030

Zhang, X., Xie, H., Xu, Z., Li, Z., & Chen, B. (2024). Evaluating landslide susceptibility: an AHP method-based approach enhanced with optimized random forest modeling. *Natural Hazards*, *120*, 8153–8207. https://doi.org/10.1007/s11069-023-06306-1

Zhou, J., Tan, Sh., Li, J., Xu, J., Wang, Ch., & Ye, H. (2023). Landslide Susceptibility Assessment Using the Analytic Hierarchy Process (AHP): A Case Study of a Construction Site for Photovoltaic Power Generation in Yunxian County, Southwest China, *Sustainability*, *15*(6), 51-81. http://dx.doi.org/10.3390/su15065281

Vol.14, No.4, Winter 2025, p. 85-104 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.93856.1579 OPEN ACCESS

Evaluation of Soil Salinity Zonation Using Remote Sensing and Geostatistical Methods in the Alluvial Plain Lands of the Tigris River, Iraq

Marvan Al-Refahi [1], Alireza Karimi [2], Ebrahim Mahmoudabadi [3*], Morteza Akbari [4]

[1] MSc Graduate, Department of Soil Sciences, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
[2] Professor in soil sciences, Department of Soil Sciences, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
[3] Assistant Professor, Department of Desert and Arid Zones Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
[4] Associate Professor, Department of Desert and Arid Zones Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 01 June 2025

Revised: 25 October 2025

Accepted: 27 October 2025

Available Online:

31 October 2025

Keywords:

Soil Salinity Mapping

Soil Electrical Conductivity

Geostatistics

Remote Sensing

Tigris River

ABSTRACT

One of the essential requirements in soil salinity management and reclamation is access to high accuracy salinity maps. This study was conducted to evaluate the accuracy of soil salinity mapping using remote sensing and geostatistical methods in a part of the alluvial lands of the Tigris River within the Al-Suwayrah farms in Iraq, located 30 km south of Baghdad. For this purpose, 100 soil samples were collected using a regular grid with 1,000 m spacing from a depth of 0–20 cm across an area of 10,000 hectares, and the electrical conductivity (EC) of the saturated paste extract was measured. Spectral bands and indices of ASTER and Landsat satellite images were prepared in three spectral modes: digital number (DN), radiance, and reflectance. Subsequently, using multiple linear regression, equations were developed between the derived spectral indices in each spectral mode and soil salinity, and a soil salinity map was also generated using the kriging method. The results of comparing the radiance, reflectance, and DN spectral modes for salinity modeling indicated that the Landsat satellite in reflectance mode achieved the highest accuracy (MBE = −1.24, RMSE = 4.58) among the remote sensing methods. Comparison of the remote sensing and geostatistical approaches showed that the geostatistical method, due to the use of measured field data, exhibited higher accuracy (MBE = −0.06, RMSE = 3.53) than the remote sensing methods; however, the maps produced by remote sensing also demonstrated acceptable accuracy, and the salinity map derived from this method closely corresponded to the salinity distribution map obtained from geostatistics. Considering the lower cost and time requirements, as well as the capability for temporal repetition, remote sensing methods can be effectively used to produce reconnaissance level soil salinity maps for the alluvial plain of the Tigris River with acceptable accuracy.

* Corresponding author: Ebrahim Mahmoudabadi E-mail address: Mahmoudabadi@um.ac.ir

How to cite this article: Al-Refahi, M., Karimi, A., Mahmoudabadi, E., & Akbari, M. (2025). Evaluation of Soil Salinity Zonation Using Remote Sensing and Geostatistical Methods in the Alluvial Plain Lands of the Tigris River, Iraq. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 14*(4), 85-104. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.93856.1579

©2025 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

Soil salinity is a major environmental challenge in arid and semi-arid regions, as it negatively affects agricultural productivity and can cause irreversible soil degradation. Accurate assessment of soil salinity is therefore essential for sustainable land management. The Tigris alluvial plain in Iraq an agriculturally important region is highly susceptible to salinization due to its arid climate and intensive irrigation practices. Providing precise information on soil properties, particularly salinity, is crucial for managing land resources and improving crop production.

Traditional soil mapping and sampling methods are time-consuming, costly, and spatially limited. In recent years, remote sensing techniques have emerged as effective tools for large-scale soil salinity assessment. Spectral indices derived from satellite imagery enable the detection of subtle variations in soil characteristics such as moisture, salinity, organic matter, and texture. Geostatistical methods, particularly kriging, also offer powerful capabilities for interpolating field-based soil salinity measurements. Although many studies worldwide have explored the application of remote sensing and geostatistical approaches for soil salinity mapping, each region possesses unique environmental and soil conditions that influence the accuracy of these techniques. The Tigris alluvial plain presents specific challenges due to its soil properties, vegetation cover, and hydrological conditions. Therefore, evaluating the performance of these techniques in this region is essential for identifying the most accurate method for soil salinity assessment and for supporting effective management of soil degradation.

Material and Methods

The study was conducted in the alluvial plain of the Tigris River, within the Al-Suweera (Alsouyreh) region, approximately 30 km south of Baghdad, Iraq. Soil samples were collected using a systematic grid sampling scheme with a spacing of 1000 m, covering an area of 10,000 ha at a depth of 0–20 cm. Laboratory analyses included electrical conductivity (EC), pH, and sodium adsorption ratio (SAR).

Satellite imagery from ASTER and Landsat was processed using three spectral modes Digital Number (DN), radiance, and reflectance to generate soil salinity maps. The kriging interpolation technique was applied to the field-measured salinity data to produce geostatistical salinity maps.

Accuracy assessment of the resulting maps was performed using Mean Bias Error (MBE) and Root Mean Square Error (RMSE), which are widely used metrics for evaluating differences between observed and estimated values.

Results and Discussion

The results indicated that the radiance mode of Landsat imagery and the reflectance mode of ASTER imagery provided the highest accuracy among remote sensing–based salinity estimates. However, the geostatistical approach (kriging) outperformed all remote sensing methods, producing the most accurate salinity maps. Validation results showed negative MBE values for all remote sensing and geostatistical models, with the lowest MBE (–0.06) obtained using kriging. Kriging also yielded the lowest RMSE value (3.53), confirming its superior performance.

Landsat reflectance demonstrated better accuracy than all spectral modes derived from ASTER imagery. The superior accuracy of kriging can be attributed to its direct reliance on dense field measurements, which is particularly advantageous for relatively small study areas with adequate sampling density.

Both the remote sensing and geostatistical maps showed similar spatial patterns of salinity distribution and exhibited strong agreement, highlighting the potential of remote sensing for large-scale soil salinity mapping. The spatial patterns revealed lower salinity levels in the southern part of the study area and higher levels in the northern part, nearer the Tigris River. This aligns with actual field conditions, where the southern region has benefited from surface drainage systems since 2000, reducing salinity.

Conversely, the northern region relies on long-term irrigation with saline river water (ECw = 4 dS/m) and lacks an effective drainage system, resulting in persistent salinity accumulation.

Conclusion

This study demonstrates the effectiveness of remote sensing and geostatistical methods for soil salinity mapping in arid environments such as the Tigris alluvial plain in Iraq. Although geostatistical methods particularly kriging were found to provide the highest accuracy, remote sensing offers valuable spatial information and is well suited for broader scale assessment. Maps produced by both approaches provide essential data for monitoring soil degradation and guiding land management strategies. The results also underscore the importance of proper drainage infrastructure in preventing salinity buildup, especially in areas where irrigation depends on saline river water.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support of Ferdowsi University of Mashhad (Project Code: 47644), which made this research possible.

جلد ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، ص ۱۰۴-۸۵ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.93856.1579 دسترسی آزاد

مقایسهٔ پهنه‌بندی شوری خاک با استفاده از روش‌های دورسنجی و زمین آمار در اراضی دشت آبرفتی رودخانهٔ دجلهٔ عراق

مروان الرفاهی[۱]، علیرضا کریمی[۲]، ابراهیم محمودآبادی[۳*]، مرتضی اکبری[۳]

[۱] دانش آموختهٔ کارشناسی ارشد گروه مهندسی علوم خاک، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

[۲] استاد گروه مهندسی علوم خاک، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

[۳] استادیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

[۴] دانشیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکدهٔ منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵

کلمات کلیدی:

نقشه‌برداری شوری خاک

هدایت الکتریکی خاک

زمین آمار

سنجش از دور

رودخانه دجله

چکیده

یکی از موارد ضروری در مدیریت و اصلاح شوری خاک دسترسی به نقشه با دقت بالا است. این پژوهش با هدف بررسی دقت نقشه شوری خاک با استفاده از روش‌های سنجش از دور و روش زمین آمار در بخشی از اراضی آبرفتی رودخانه دجله در مزارع الصویره عراق در فاصله ۳۰ کیلومتری جنوب بغداد انجام شد. برای این منظور، تعداد ۱۰۰ نمونه خاک با روش شبکه منظم با فاصله ۱۰۰۰متر از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری در محدوده‌ای به وسعت ۱۰ هزار هکتار برداشت شد و مقدار هدایت الکتریکی (EC) در عصارهٔ گل اشباع نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شد. باندها و شاخص‌های طیفی تصاویر ماهواره استر و لندست، در سه حالت طیفی، ارزش رقومی (DN)، تابش طیفی (radiance) و بازتابش (reflectance) تهیه شد. سپس با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه معادله بین شاخص‌های به‌دست آمده در هر حالت طیفی و مقدار شوری به‌دست آمد، همچنین با استفاده از روش کریجینگ نیز نقشه شوری خاک ترسیم گردید. نتایج مقایسه حالت‌های طیفی radiance، reflectance و DN برای مدلسازی شوری بیانگر آن بود که ماهواره لندست درحالت بازتابش بیشترین دقت (MBE=-1.24 , RMSE=4.58) را در مدلسازی شوری خاک در بین روشهای سنجش از دوری داشت. مقایسه روش‌های سنجش از دور و زمین‌آمار نشان داد که روش زمین‌آمار به دلیل استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده دارای دقت بالاتری (MBE=-0.06, RMSE=3.53) نسبت به روش‌های سنجش از دوری بود اما همچنان نقشه‌های به‌دست آمده از روش سنجش از دور نیز دقت قابل قبول را دارا بودند و نقشه شوری به‌دست آمده از این روش با نقشه پراکنش شوری خاک حاصل از روش زمین‌آمار همخوانی زیادی داشت. با توجه به هزینه و وقت کمتر با قابلیت تکرار در دوره‌های زمانی، روشهای سنجش از دور در تهیه نقشه‌های اجمالی شوری خاک دشت آبرفتی رودخانه دجله با دقت قابل قبول می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

* نویسندهٔ مسئول: ابراهیم محمودآبادی

Email: Mahmoudabadi@um.ac.ir

مقدمه

زمین‌های زراعی الصویره در ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهر بغداد، و بر روی اراضی دشت آبرفتی رودخانه دجله نقش به‌سزایی در تولید مواد غذایی به ویژه غلات، گندم و جو در کشور عراق دارد به طوری که این شهر رتبه اول در تولید محصولات کشاورزی در استان واسط عراق را دارد. کشت متوالی و آبیاری اراضی الصویره با آب دجله و بالا بودن سطح سفره‌های آب زیرزمینی این مناطق و اقلیم گرم با تبخیر فراوان سبب شده تا املاح در سطح خاک تجمع یابد و موجب شور شدن و غیر قابل کشت شدن قسمت‌هایی از اراضی این منطقه شود (Al-Senafy & Abraham, 2004). براساس گزارش فرانکن (Frenken, 2009) شوری خاک زمین‌های کشاورزی عراق موجب کاهش ۳۰ درصدی عملکرد در۷۰ درصد از اراضی تحت آبیاری این کشور شده است. در گزارشات فائو (FAO, 2012) نیز آمده است که به دلیل مشکلات شوری خاک‌های عراق، پتانسیل تولید و عملکرد ۷۰ درصد از زمین‌های کشاورزی این کشور کاهش یافته است، که در مجموع باعث کاهش ۳۰ درصدی تولید محصولات کشاورزی عراق شده است.

با توجه به اهمیت زمین‌های کشاورزی بین النهرین در تولید و اقتصاد مردم و کشور عراق و مشکلاتی که این اراضی از نظر شوری پیدا کرده‌اند شناسایی و تهیه نقشه شوری خاک با دقت مناسب می‌تواند شناخت بهتری از اراضی و تأثیرات کشاورزی بر خاک منطقه را روشن نماید و در جهت پایش وضعیت شوری و اعمال مدیریت مکانی مناسب منطقه بسیار کارآمد باشد. برای تهیهٔ نقشهٔ شوری خاک از روش‌های گوناگونی استفاده می‌شود که نقشه‌برداری مرسوم[1] عمومی‌ترین روش نقشه‌برداری تا چند دههٔ گذشته بود. نقشه‌های پلی‌گونی و گسسته محصول این روش است اما منطق ناپیوسته موجود در این روش به عنوان مهمترین محدودیت و خطای موجود در این نوع نقشه‌برداری معرفی شده است (Mahmoudabadi, Karimi, Haghnia & Sepehr, 2017b). با ورود به عصر تکنولوژی و پیدایش کامپیوتر و ارسال ماهواره‌ها به مدار زمین و در نتیجه دسترسی به ابزار جدید و اطلاعات سنجش از دور، روش‌های نقشه‌برداری نیز به روز شدند. در ابتدا روش‌های زمین‌آماری معرفی شدند. روش زمین‌آمار قادر است با استفاده از داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده و استفاده از تخمین‌گرهای آماری مختلف به برآورد ویژگی مورد نظر در نقاطی که نمونه‌برداری نشده‌اند بپردازد و می‌توان از آن برای درون‌یابی داده‌های شوری خاک و تهیهٔ نقشه‌های پیوسته توزیع شوری خاک استفاده کرد (Panagiotou & Tziritis, 2022). در روش‌های زمین آمار، برای به‌دست آوردن دقت مناسب، نیاز به تعداد زیاد نمونه است که باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود. به عنوان راه حل جایگزین، استفاده داده‌های سنجش از دور به‌دلیل پوشش زیاد سطح زمین و ارتباط با ویژگی‌های خاک، قابلیت برآورد شوری خاک با هزینه مناسب را دارند. روش سنجش از دور، اطلاعات ارزشمندی در مورد تغییرات مکانی و زمانی در خواص و شرایط خاک ارائه می‌کند که شامل استفاده از سنسورهای ماهواره‌ای، زمینی یا هوابرد برای گرفتن تصاویر و داده‌های مربوط به ویژگی‌های خاک است. این حسگرها می‌توانند تشعشعات الکترومغناطیسی منعکس شده یا ساطع شده توسط خاک را شناسایی کنند و برای پیش‌بینی و تهیهٔ نقشه ویژگی‌های خاک استفاده کردند (Abdulraheem et al., 2023; Srivastava, Srivastava, Singh, Gupta & Dugesar, 2025) . داده‌های سنجش از دور ماهواره‌هایی مانند Landsat و ASTER اغلب به سه شکل نمایش داده می‌شوند: اعداد دیجیتال (DN)، درخشندگی(Radiance) و انعکاس (Reflectance). هر یک از این فرمها بینش‌های متفاوتی را ارائه می‌دهند و برای کاربردهای مختلف در رصد زمین و نظارت بر محیط زیست استفاده می‌شوند. اعداد دیجیتال (DN) مقادیر پیکسل خام هستند که مستقیماً از سنسورهای ماهواره‌ای به دست می‌آیند. مقادیر DN برای هر سنسور خاص است و تحت تأثیر عواملی مانند ویژگی‌های سنسور و تنظیمات کالیبراسیون قرار می‌گیرد (Yale center, 2024) تشعشع اندازه‌گیری مقدار انرژی نوری است که از سطح زمین ساطع یا منعکس شده و توسط حسگر تشخیص داده می‌شود. این یک کمیت فیزیکی است و معمولاً بر حسب واحد وات بر متر مربع بر استرادیان بر میکرومتر ($W/m^2/sr/\mu m1$) بیان می‌شود. مقادیر تشعشع با اعمال ضرایب کالیبراسیون رادیومتری به مقادیر DN به دست می‌آید. این فرآیند تعصبات خاص حسگر

1- Conventional soil mapping

را تصحیح می‌کند و مقادیر DN را به معیار استانداردی از انرژی ساطع شده یا منعکس شده تبدیل می‌کند (USGS, 2024). انعکاس نسبت مقدار نور منعکس شده توسط سطح زمین به مقدار نوری است که بر روی آن تابیده می‌شود. این یک کمیت بدون بعد است و معیار نرمال شده‌ای از خواص سطح را ارائه می‌دهد و برای مقایسه داده‌ها در زمان‌ها و حسگرهای مختلف مفید است. مقادیر بازتاب از درخشندگی با تصحیح اثرات جوی و زوایای روشنایی خورشیدی به دست می‌آیند. این اصلاح تضمین می‌کند که مقادیر بازتاب، صرف نظر از زمان روز یا شرایط جوی، سازگار و قابل مقایسه هستند. به طور کلی، در حالی که مقادیر DN داده‌های خام و کالیبره‌نشده از حسگرهای ماهواره‌ای هستند، تابش اندازه‌گیری انرژی واقعی شناسایی‌شده را ارائه می‌دهد و بازتاب یک معیار نرمال‌شده و قابل مقایسه از ویژگی‌های سطح را ارائه می‌دهد. انتخاب نوع داده مورد استفاده برای تخمین شوری خاک می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر دقت و قابلیت اطمینان نتایج داشته باشد. به‌دست آوردن و پردازش داده‌های DN نسبتاً آسان است، اما ممکن است تحت تأثیر تغییرات در حساسیت سنسور قرار گیرند. داده‌های Radiance اطلاعاتی در مورد انرژی ساطع یا منعکس شده از یک سطح ارائه می‌دهد، اما تفسیر و استفاده در تخمین شوری خاک می‌تواند چالش برانگیز باشد. داده‌های بازتاب پایدارتر هستند و اطلاعات دقیق‌تری در مورد خواص سطح ارائه می‌دهند، اما نیاز به پردازش پیچیده‌تری دارند (Sayler & Zanter, 2024). هدف این مقاله مقایسه اثربخشی داده‌های DN، تابش و بازتاب از تصاویر لندست و استر برای تخمین شوری خاک، و مقایسهٔ نتایج با نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از روش‌های زمین‌آماری بود. در این مطالعه، نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از داده‌های DN، درخشندگی و بازتاب از تصاویر لندست و استر برای تخمین شوری خاک مورد مقایسه قرار گرفت. دقت و قابلیت اطمینان هر روش بررسی شد و در نهایت بهترین و مؤثرترین رویکرد در برآورد شوری خاک منطقه ارائه گردید.

منطقهٔ مورد مطالعه

منطقهٔ مورد مطالعه در جنوب شهر بغداد در منطقه الصویره از اراضی حاشیه رودخانه دجله انتخاب گردید. الصویره دارای اقلیم خشک است که میزان متوسط بارندگی سالیانه این منطقه حدود ۱۲۵ میلی‌متر است و متوسط دمای سالیانه ۲۳/۵ درجه سانتی‌گراد است. سطح آب زیرزمینی در اراضی الصویره بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر است.

محدوده‌ای به وسعت ده هزار هکتار در بین طول جغرافیایی ″۴۴°۵۳′۴۳/۴۴ تا ″۴۵°۲′۵۵/۴۱ شرقی و عرض جغرافیایی ″۳۲°۴۱′۳۳/۷۶ و ″۳۲°۵۱′۰/۶۷ شمالی مورد مطالعه و نمونه‌برداری قرار گرفت (شکل ۱). این محدوده شامل؛ زمین‌های با کشت (گندم و جو) و همچنین وجود اراضی فاقد کشت در مجاورت آنها است. ارتفاع این منطقه از سطح دریا بیست متر و عمق آب زیرزمینی در فاصله دو متری قرار دارد.

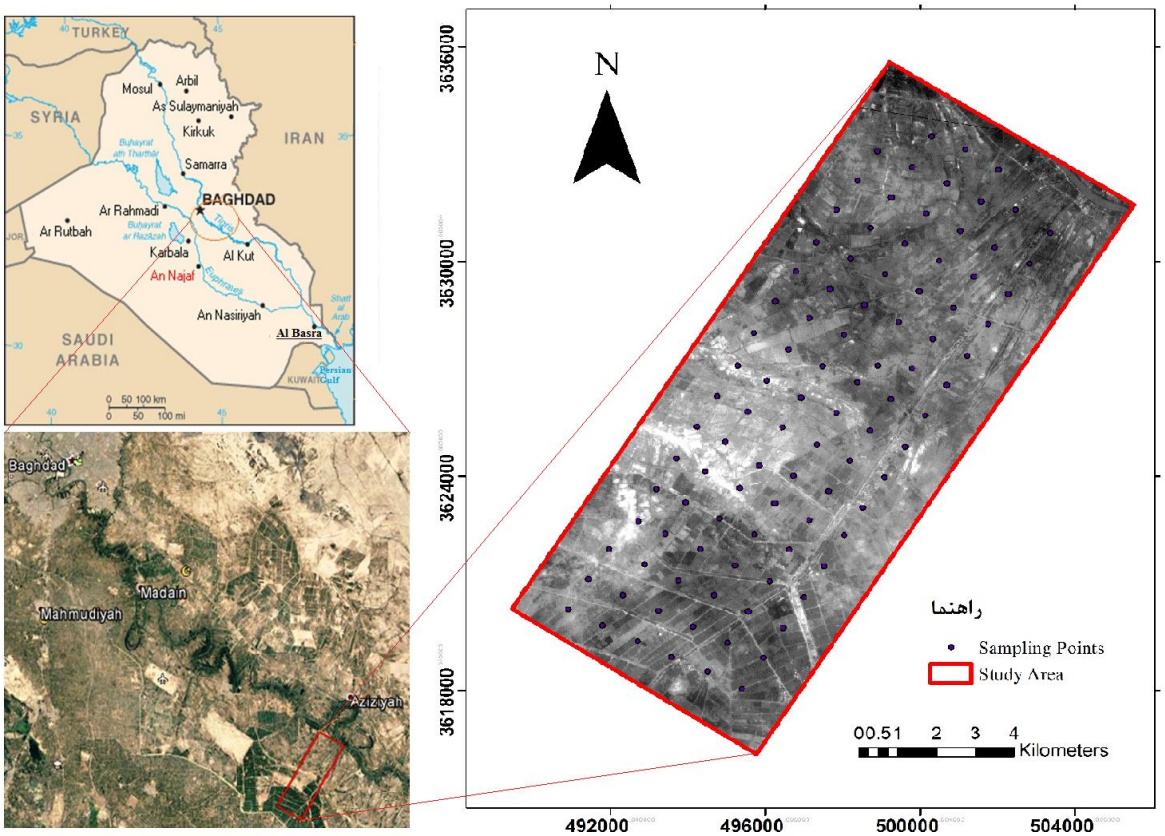
مواد و روش‌ها

تعداد نمونه و روش نمونه‌برداری

تعداد ۱۰۰ نمونه سطحی به صورت شبکهٔ منظم و با فاصله ۱۰۰۰ متر از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری سطح خاک در منطقه‌ای به وسعت ۱۰ هزار هکتار از اراضی کشت شده و فاقد کشت نمونه‌برداری شد. همچنین، از آب رودخانه دجله نیز نمونه‌برداری صورت گرفت.

آنالیزهای آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه و هوا خشک نمودن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، مورد آنالیز آزمایشگاهی قرار گرفتند. بافت خاک به روش هیدرومتری، pH وEC در عصارهٔ گل اشباع، ماده آلی به روش والکی بلاک، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون، املاح محلول کلسیم و منیزیم به روش تیتراسیون و سدیم به وسیله دستگاه فلیم فتومتر مدل PFP7 اندازه‌گیری شدند (Pansu, 2006).



شکل ۱- محدودهٔ جغرافیایی منطقهٔ مورد مطالعه در حاشیهٔ رودخانهٔ دجله - عراق

Fig. 1. Geographic extent of the study area along the Tigris River margin, Iraq

تجزیه و تحلیل داده‌ها

آماره‌های توصیفی شامل میانگین، حداقل، حداکثر، انحراف معیار، ضریب تغییرات، چولگی و کشیدگی محاسبه شدند. در این پژوهش، علاوه بر آزمون چولگی و کشیدگی برای بررسی نرمال بودن یا نبودن توزیع داده‌ها از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف[1] نیز استفاده شد. تمامی تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم افزار SPSS16 انجام شدند.

تهیهٔ تصاویر ماهواره‌ای

به منظور بررسی تغییرات شوری خاک در منطقهٔ مورد مطالعه به وسیلهٔ اطلاعات ماهواره‌ای از تصاویر ماهوارهٔ لندست و استر استفاده شد. این تصاویر از سایت www.earthexplorer.usgs.gov تهیه و دانلود شد. تاریخ نمونه‌برداری و تصاویر ماهواره‌ای مطابق با تاریخ نمونه‌برداری از تصاویر تاریخ ۲۰۱۷/۱۱/۱۸ ماهواره استر و همچنین از تصاویر ماهواره لندست ۸ (سنجنده OLI) در تاریخ ۲۰۱۷ /۱۱/۱۰ استفاده شد.

تبدیل طیفی تصاویر ماهواره‌ای

تبدیل DN به Radiance و بالعکس

تصاویر اولیهٔ به‌دست آمده از باندهای مختلف ماهواره لندست ۸ بر حسب DN است و تصاویر اولیهٔ ماهواره استر برحسب رادیانس است، که جهت تبدیل طیف DN به رادیانس از رابطه (۱) استفاده شد.

1- Kolmogrov- Smirnov test

$$L = Lmin + ((Lmax-Lmin) / DNmax) * DN \quad (۱)$$

در این رابطه L مقدار رادیانس، DN مقدار رقومی پیکسل مورد نظر، DNmax حداکثرDN ثبت شده به وسیله سنجنده مورد نظر و Lmax و Lmin به ترتیب حداکثر و حداقل رادیانس سنجنده مورد نظر است. تصاویر اولیه به‌دست آمده از ماهواره استر برحسب رادیانس است که برای تبدیل رادیانس به DN از رابطه (۲) استفاده شد.

$$DNi = (Li / coefi) + 1 \quad (۲)$$

در این رابطه Li رادیانس پیکسل مورد نظر، DNi مقدار رقومی پیکسل مورد نظر و coefi ضریب تبدیل DN به رادیانس است.

تبدیل تابش طیفی (Radiance) به بازتابش (Reflectance)

به منظور تبدیل مقدار رادیانس تصاویر ماهواره‌ای لندست و استر از رابطه (۳) استفاده شد.

$$\rho = \frac{\pi.L.d^2}{ESUN.COS(Sz)} \quad (۳)$$

در این رابطه ρ مقدار Reflectance، L مقدار رادیانس پیکسل مورد نظر، d فاصله زمین تا خورشید بر حسب واحد نجومی، ESUN ارتفاع خورشید و SZ زاویهٔ خورشید در هنگام تابش در زمانی که ماهواره در حال ثبت تصویر است.

شاخص‌های مبتنی بر سنجش از دور جهت پهنه‌بندی و ارزیابی شوری خاک

جهت ارزیابی شوری خاک منطقهٔ مورد مطالعه به وسیله تصاویر ماهواره‌ای از شاخص‌های تعریف شده در این زمینه استفاده شد. در ماهوارهٔ لندست از شاخص‌های[1](SI1، SI2، SI3)، BI[2]، NDVI[3]، IPVI[4]، DVI[5]، PD322[6] و باندهای ۱ تا ۷ این ماهواره استفاده شد (جدول ۱). شاخص‌های مورد استفاده برای ماهواره استر شامل SI1، SI2، SI3، NDVI، BI و باندهای ۱ تا ۳ از این ماهواره بوده که فرمول محاسبه شدند (جدول ۲).

نقشه‌های حاصل از اطلاعات ماهواره‌ای

به منظور تهیهٔ نقشه‌های شوری خاک منطقهٔ مورد مطالعه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ابتدا شاخص‌های به دست آمده از داده‌ای دو ماهواره استر و لندست در سه حالت DN، Radiance و Reflactance محاسبه شد. سپس با استفاده از نرم افزار SPSS رابطه بین شاخص‌های به‌دست آمده از تصاویر به عنوان متغیرهای مستقل و مقادیر واقعی شوری به‌عنوان متغیر وابسته از روش رگرسیون خطی گام به گام به‌دست آمد. ابتدا نرم‌افزار انواع روابط ممکن میان شوری و متغیرهای مستقل را بررسی کرد و در نهایت چندین مدل پیشنهاد نمود که با توجه به ضریب تبیین مناسب‌ترین معادله انتخاب شد (Mahmoudabadi et al., 2017a). برای آزمون معنی‌دار بودن مدل رگرسیونی از آزمون F استفاده گردید. در صورت معنی‌داری مدل رگرسیون، معنی‌دار بودن ضرایب آن با استفاده از آزمون t نیز مورد بررسی قرار گرفت. در گام آخر، با استفاده از نرم افزار Arc GIS نسخه ۱۰/۳ نقشه‌های شوری خاک با استفاده از معادله رگرسیونی برای حالتهای طیفی مختلف ترسیم شد. در این بخش در مجموع ۶ نقشه شوری از سه حالت مختلف طیفی برای دو ماهواره لندست و استر تهیه شد.

1- Saline Index
2- Brightness index
3- Normalized difference vegetation index
4- Infrared Percentage Vegetation Index
5- Difference Vegetation Index
6- Potential Different

جدول ۱- شاخص‌های پردازش شده روی تصاویر ماهواره لندست

Table 1- Spectral indices acquired from Landsat satellite images

شاخص **Index**	معادله **Formula**	منبع **Reference**
SI1	$\sqrt{B2 * B3}$	Zarco-Tejada et al. (2005)
SI2	$\sqrt{B2\hat{}2 + B3\hat{}2 + B4\hat{}2}$	
SI3	$\sqrt{B2^2 + B3\hat{}2}$	
NDVI	$\frac{B2 - B5}{B2 + B5}$	Mahmoudabadi et al. (2017)
DVI	$B4 - B3$	
PD322	$\frac{B3 - B2}{B3 + B2}$	
IPVI	$\frac{B4}{B3 + B4}$	Wiegand et al. (1991)
B1	Blue Visible	-
B2	Green Visible	-
B3	Red Visible	-
B4	Near Infrared	-
B5	Middle Infrared	-
B6	-	-
B7	Far Infrared	-

جدول ۲- شاخص‌های پردازش شده روی تصاویر ماهواره استر

Table 2- Spectral indices acquired from Aster satellite images

شاخص **Index**	معادله **Formula**	منبع **Reference**
SI_1	$\sqrt{B1 * B2}$	Zarco-Tejada et al. (2005)
SI_2	$\sqrt{B1\hat{}2 + B2\hat{}2 + B3\hat{}2}$	
SI_3	$\sqrt{B1^2 + B2\hat{}2}$	
NDVI	$\frac{B2 - B3}{B2 + B3}$	Gao (1996)
BI	$\sqrt{B2\hat{}2 * B3\hat{}2}$	
B_1	Red Visible	-
B_2	Green Visible	-
B_3	Blue Visible	-

نقشه‌های شوری حاصل از زمین آمار

جهت تهیهٔ نقشه‌های شوری به روش کریجینگ ابتدا شناخت و مدلسازی ساختار مکانی شوری توسط آنالیز نیم‌تغییرنما بررسی شد. در گام بعد تخمین شوری با توجه به وزن‌دهی و واریوگرام مرحله قبل صورت گرفت. از روش اعتبارسنجی تقاطعی برای اعتبارسنجی مدل استفاده گردید.

تحلیل ساختار مکانی

در صورت وجود ساختار مکانی نقاط نزدیک به هم شباهت بیشتری نسبت به نقاط دور از هم نشان می‌دهند که این پیش شرط استفاده از زمین آمار می‌باشد. مقادیر نیم تغییرنمای تجربی نشان دهنده درجه تفاوت بین مقدار نمونه و مقادیر داده‌های اطراف آن است. محاسبه تغییرنما اولین گام در بررسی تغییرات مکانی متغیر است. جهت محاسبه تغییرنما از فرمول (۴) به شرح زیر استفاده گردید:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad (۴)$$

که در آن: γ (h) : از مقدار نیم تغییرنما، N (h) : تعداد زوج نقاط، z(xi) : مقدار مشاهده‌های متغیر x در موقعیت i ، z(xi + h): مقدار مشاهده‌های متغیر در فاصله h از xi می‌باشند. در گام بعدی برازش مناسب‌ترین مدل تئوری به تغییرنمای تجربی می‌باشد. که این انتخاب این مدل توسط محاسبه حداقل مجموع مربع انحرافات و بیشینهٔ ضرایب تعیین و محاسبه حداکثر احتمال می‌باشد. محاسبه وزن حداقل مجموع مربع انحرافات رایج‌ترین تکنیک مورد استفاده است.

مدل برازش داده شده، اطلاعاتی درباره ساختار مکانی داده‌ها را برای پهنه‌بندی توسط تخمین‌گر کریجینگ می‌دهد. کریجینگ تخمین‌گری است که بر منطق میانگین وزنی استوار می‌باشد. این تخمین‌گر بهترین تخمین‌گر ناریب[1] است.

آزمون اعتبارسنجی داده‌ها

به منظور ارزیابی و مقایسهٔ بین داده‌های برآورد شده هدایت اکتریکی با روش‌های مختلف و داده‌های هدایت اکتریکی اندازه‌گیری ده از معیارهای مجذور میانگین مربعات باقیمانده[2] و میانگین اریبی خطا[3] استفاده شد که این معیارها با فاصله یافتن از صفر، کمی دقت و یا زیاد بودن انحراف را نشان می‌دهد (Webster & Oliver, 2007).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{Z}(xi) - Z(xi)\right)^2} \quad (۵)$$

$$MBE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{Z}(xi) - Z(xi)\right) \quad (۶)$$

نتایج و بحث

خلاصه آماری خصوصیات خاک منطقهٔ مورد مطالعه

پارامترهای آماری برخی از ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک منطقهٔ مورد مطالعه، در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول نتایج تجزیه آماری شامل معیارهای مرکزی داده‌ها (میانگین، میانه)، پارامترهای مربوط به نحوهٔ توزیع داده‌ها (واریانس و انحراف معیار) و پارامترهای شکل توزیع (چولگی، کشیدگی و ضریب تغیرات) ویژگی‌های مورد بررسی ارائه شده است.

باتوجه به نتایج میانگین EC_e، PH_e و SAR به ترتیب برابر با ۲۰/۹۵ دسی زیمنس بر متر، ۷/۷۴ و ۱۰/۵۰ بود (جدول ۳) که بر این اساس خاک منطقهٔ مورد مطالعه در محدودهٔ خاک‌های شور قرار می‌گیرد (Hammam & Mohamed, 2020).

میانگین درصد رس، سیلت و شن خاک به ترتیب برابر ۵۲/۲، ۳۲/۵ و ۱۴/۱ درصد است که نشان می‌دهد که خاک منطقه، دارای بافت سنگین با مقدار زیاد رس است، که شرایط مناسبی را برای تجمع املاح محلول و شور شدن خاک ایجاد می‌کند. جابر و ژائو (Jabbar & Zhou, 2012) در بررسی شوری اراضی آبرفتی اطراف رودخانه دجله در استان بصره عراق گزارش کردند که وجود بافت رسی سنگین در این مناطق باعث تشدید شوری خاک شده است. بیشترین میزان ضریب تغییرات در بین پارامترهای اندازه‌گیری شده مربوط به ECe خاک به میزان ۶۹ درصد است (جدول ۳)، که تغییرات زیاد شوری خاک را نشان می‌دهد، که احتمالاً، می‌تواند به دلیل توپوگرافی منطقه و وجود پستی و بلندی‌هایی کوچک در سطح منطقه باشد که باعث ایجاد شرایط ماندآبی برای آب باران یا آب حاصل از آبیاری رودخانه دجله شده و از طرفی تبخیر زیاد در این منطقه، سبب تجمع نمک در این قسمت‌ها می‌شود و این امر موجب بالا بودن ضریب تغییرات شوری خاک شده است.

1- Unbias Estimator
2- Root Mean Square Error (RMSE)
3 -Mean Bias Error (MBE)

جدول ۳- تجزیه آماری برخی از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک منطقهٔ مورد مطالعه

Table 3- Statistical analysis of selected physical and chemical soil parameters in the study area

خلاصهٔ آماری	هدایت الکتریکی ECe	اسیدیته pH	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	سدیم Na	کلسیم Ca	منیزیم Mg	نسبت سدیم جذبی
حداقل Min	11.1	7.2	35.7	19.3	1	8.3	7.3	5.7	3.4
حداکثرMax	38.4	8.2	69.1	45.3	33	107.9	60	40.7	15.1
میانگین Mean	20.9	7.7	52.2	32.5	14.1	56.2	24.9	21.3	10.5
میانه Median	18.3	7.1	53.4	33.3	14.3	53.3	27.1	23.7	9.1
چولگی Skewness	1	-0.001	-0.1	-0.3	0.7	0.2	-0.05	-0.1	-0.3
کشیدگیKurtosis	0.2	-0.2	-0.03	-0.4	0.1	-0.5	-0.6	-0.01	-0.4
واریانسVariance	13.4	0.05	59.1	44.1	56.7	0.1	5.9	59.9	44.1
انحراف معیارStd.Dev	3.7	0.2	7.7	6.6	7.5	0.2	2.4	7.7	6.6
ضریب تغییراتCV	69	3	15	20	50	39	9	15	20

یاهییو و همکاران (Yahiaoui, Douaoui, Zhang & Ziane, 2015) در بررسی تغییرات شوری خاک در دشت چلیف کشور الجزایر گزارش دادند، که ارتباط مستقیمی بین شوری خاک و پستی و بلندی‌های کوچک سطح منطقه وجود دارد.

نقشه‌های شوری خاک، به‌دست آمده از پردازش اطلاعات طیفی ماهواره لندست

جهت تهیهٔ نقشه‌های شوری خاک با استفاده از اطلاعات طیفی ماهواره لندست در سه حالت طیفی مختلف (DN، radiance و reflectance)، از روش رگرسیون گام به گام استفاده شد. با توجه به معادلهٔ خط (جدول ۴) به‌دست آمده، میزان EC برآورد شد و برای ترسیم نقشه‌های شوری مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۴- معادلات رگرسیونی تخمین EC خاک با استفاده از اطلاعات تصاویر ماهواره لندست

Table 4- Regression equations for estimating soil EC using Landsat satellite imagery data

حالت طیفی Spectral mode	پارامتر Parameter	معادله خط Equation
DN	EC	EC = (0.029×B1) – (11121.87×PD322) – 251.84
Radiance	EC	EC = (2.6×B1) – (1860×PD322) – 490.80
Reflectance	EC	EC = (776.5×B1) – (460.14×PD322) – 113.27

نقشهٔ شوری خاک، به‌دست آمده از اطلاعات ماهواره لندست در حالت طیفی DN

نقشهٔ پراکنش شوری خاک، تهیه شده از اطلاعات طیفی ماهواره لندست در حالت طیفی DN در شکل ۲ ارائه شده است. در نقشهٔ حاصل (شکل ۲- الف) نقاط روشن دارای EC زیاد (EC>30.82 dS/m) و نقاط تیره دارای EC کم (EC<11.25 dS/m) است. دامنهٔ EC برآورد شده به وسیله تصاویر ماهواره لندست در حالت DN بین ۱۱/۲۵ تا ۸۴/۱۸ دسی‌زیمنس بر متر است که این محدوده بزرگ‌تر از دامنه EC_e اندازه‌گیری شده در سطح منطقه (11.05 – 38.40 dS/m) است (جدول ۳).

بر این اساس بیشتر نقاط روشن که دارای شوری بیشتری است، در نواحی مرکزی و شمالی منطقهٔ مورد مطالعه مشاهده می‌شود و نقاط تیره که دارای شوری کمتری است در نواحی جنوبی منطقه مشاهده می‌شود، که نشان دهندهٔ شورتر بودن نیمهٔ شمالی منطقه (نزدیک به رودخانه دجله) نسبت به نیمهٔ جنوبی است. احتمالاً آبیاری بیشتر مناطق نزدیک به رودخانه دجله با آب

شور رودخانه (EC_w = 4 dS/m) باعث شورتر شدن این نواحی شده است. مویل و حسین (Moyel & Hussain, 2015) گزارش کردند که EC در آب رودخانه دجله بیشتر از ۳ دسی‌زیمنس بر متر است که باعث شور شدن اراضی تحت آبیاری این رودخانه شده است.

در مرکز عراق، عمق سطح آب زیرزمینی از ۱۵۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر متغییر است، و شوری آب‌های زیرزمینی این منطقه، بین ۸ تا ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر است. در جنوب عراق، تفاوت در عمق سطح آب زیرزمینی، باعث ایجاد شوری‌های متفاوتی در اراضی آبی اطراف رودخانه دجله شده است (Qureshi, Ahmad & Ahmad, 2013). الجبوری (Al-Jeboory, 1987) در تحقیقی روی شوری اراضی مرکز عراق گزارش داد، که هدایت الکتریکی عصارهٔ اشباع خاک در خاک‌های غیر کشاورزی در عمق ۲۰ سانتی‌متری فوقانی خاک بسیار زیاد بود، که علت این شوری زیاد خاک به دلیل آب‌های زیرزمینی شور و شرایط دمایی بالا منطقه نسبت داده شد. عباس (Abbas, 2010) بیان داشت که میزان شوری اراضی اطراف رودخانه دجله با افزایش فاصله از این رودخانه کاهش می‌یابد، این محقق دلیل این شورتر بودن اراضی نزدیک رودخانه را به دلیل استفاده زیاد از آب شور رودخانه گزارش نموده است. بر این اساس مناطق نزدیک رودخانه دجله به دلیل شوری زیاد برای تولید محصولات کشاورزی مناسب نیست.

نقشهٔ شوری خاک، به دست‌آمده از اطلاعات ماهواره لندست در حالت طیفی reflectance

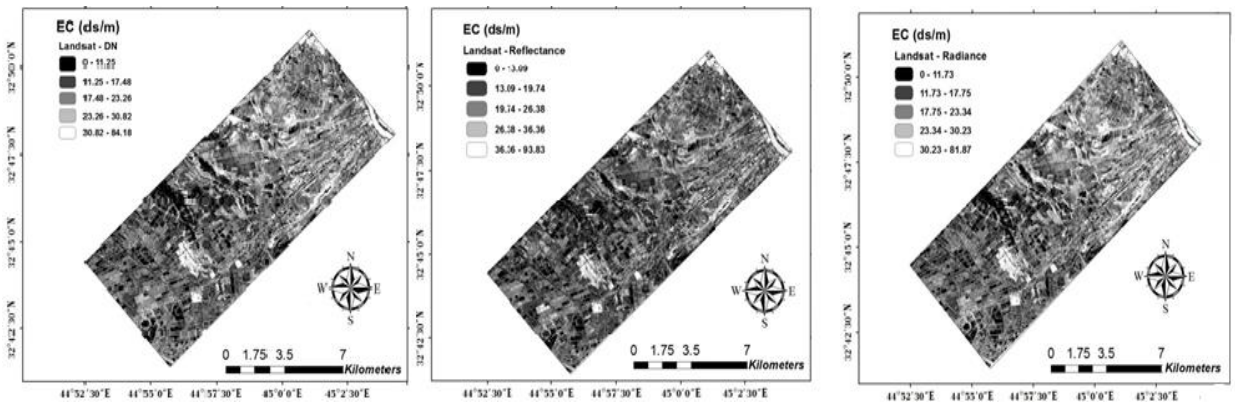
نقشهٔ شوری به‌دست آمده از EC برآورد شده از اطلاعات طیفی ماهواره لندست در حالت reflectance در شکل ۲- ب ارائه شده است. در این نقشه، بیشترین میزان EC (EC>36.36 dS/m) به صورت نقاط روشن نمایش داده شده است که بیشتر در نواحی شمالی و مرکزی منطقه، نزدیک به رودخانه دجله مشاهده شد و کمترین میزان شوری (EC<13.09 dS/m) در نواحی جنوبی منطقه دور از رودخانهٔ دجله مشاهده شد. دامنهٔ EC برآورد شده به وسیلهٔ تصاویر ماهواره لندست در حالت reflectance بین ۱۳/۰۹ تا ۹۳/۸۳ دسی‌زیمنس بر متر است (شکل ۲- ب)، که این دامنه نیز بیشتر از دامنه EC برآورد شده در حالت DN (11.25 – 84.18 dS/m) است (شکل ۲- الف). بر این اساس دامنه EC برآورد شده در حالت reflectance نسبت به حالت DN حدود ۸ درصد افزایش پیدا کرده است و اعداد بزرگتری را نشان می‌دهد، این اختلاف، گویای این مطلب است که با تبدیل حالت DN به reflectance موقعیت هندسی خورشید نسبت به سنجنده مورد نظر (ارتفاع خورشید، زاویهٔ تابش خورشید، شیب زمین و پستی و بلندی سطح منطقه) تغییر کرده، که این تغییر موقعیت، باعث شده تا ماهواره لندست ارزش رقومی بزرگتری را در هر پیکسل ثبت کند. اگر چه میزان انرژی الکترومغناطیسی ثبت شده از یک پدیدهٔ مشخص، توسط سنجده مورد نظر در حالت‌های طیفی مختلف (radiance، reflectance و DN) باید برابر باشد، ولی درآمیختگی طیفی باعث می‌شود که حتی پدیده‌های با ظاهر یکسان، بازتاب طیفی متفاوتی داشته باشند (Alavipanah, 2006). دشام و همکاران (Deschamps, Herman & Tanre, 1983) گزارش کردند که میزان DN و reflectance ثبت شده از سطح جسم برابر نیست، که علت را تغییر موقعیت هندسی خورشید نسبت به ماهواره بیان داشتند که سبب شده تا ارزش رقومی متفاوتی در هر پیکسل ثبت شود. الهارتی و همکاران (El Harti et al., 2016) در بررسی زمانی شوری خاک در دشت تادلا[1] ، مراکش گزارش کردند که تبدیل طیفی تصاویر ماهواره لندست از DN به reflectance باعث افزایش دقت در تخمین شوری خاک شد.

نقشه شوری خاک، به دست آمده از اطلاعات ماهواره لندست در حالت طیفی radiance

با توجه به نقشهٔ شوری تهیه شده از EC برآورد شده از اطلاعات طیفی تصاویر ماهواره لندست در حالت radiance (شکل ۲-ج) بیشترین شوری برآورد شده دارای EC بیشتر از ۳۰/۲۳ دسی‌زیمنس بر متر است که در شکل به صورت نقاط روشن نشان داده شده است و در نقاط شمالی و مرکزی منطقهٔ مورد مطالعه نسبت به نقاط جنوبی بیشتر مشاهده می‌شود و کمترین میزان شوری برآورد شده دارای EC کمتر از ۱۱/۷۳ دسی‌زیمنس بر متر است (رنگ تیره) که در نواحی جنوبی منطقه بیشتر مشاهده می‌شود.

1- Tadla

دامنه EC برآورد شده به وسیلهٔ تصاویر ماهواره لندست در حالت طیفی radiance بین ۱۱/۷۳ تا ۸۱/۸۷ دسی‌زیمنس بر متر است (شکل ۲-ج) که نسبت به دو حالت DN (شکل ۲-الف) و reflectance (شکل ۲-ب) دارای EC برآورد شده کمتری است. کمتر بودن EC برآورد شده در حالت radiance نسبت به دو حالت reflactance و DN نشان می‌دهد که این تغییر حالت سبب شده تا ماهواره لندست ارزش رقومی کمتری را در هر پیکسل ثبت کند، که این دامنه (Landsat - radiance) به داده‌های اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر بود. radiance مقدار انرژی الکترومغناطیسی است، که از زمین به ماهواره می‌رسد، در واقع مقدار انرژی است که در واحد سطح به ازای زاویهٔ فضایی ثبت شده است (Hajizadeh et al., 2013). این احتمال وجود دارد که با توجه به این که سطح منطقه، دارای پستی و بلندی‌های کوچکی است، سبب شده تا نمک در نقاط پست تجمع پیدا کند و نقاط روشنی را به صورت پراکنده ایجاد کند، وجود پستی و بلندی‌های منطقه در رؤیت این نقاط تأثیرگذار است و حالت radiance که مقدار انرژی ثبت شده در واحد سطح به ازای زاویه فضایی است، با تغییر در زاویه انعکاس سبب شده تا EC برآورد شده در این حالت طیفی به مقدار واقعی نزدیک‌تر باشد.



شکل ۲- نقشه شوری برآورد شده به وسیله اطلاعات ماهواره لندست در حالتهای طیفی الف -DN ب - reflectance ج-radiance

Fig. 2. Soil salinity map estimated from Landsat data in spectral modes: (a) DN, (b) reflectance, (c) radiance

نقشه‌های شوری خاک، به‌دست آمده از پردازش اطلاعات ماهواره استر

جهت تهیه نقشه‌های شوری خاک از اطلاعات طیفی ماهواره استر در سه حالت طیفی مختلف (DN، radiance و reflectance)، بعد از محاسبهٔ شاخص‌های شوری، بین این شاخص‌ها و باندهای یک تا ۳ از ماهواره استر رگرسیون خطی گام به گام برازش داده شد و با توجه به معادله خط به‌دست آمده (جدول ۵)، میزان EC تخمین زده شد و برای ترسیم نقشه‌های شوری مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۵- معادلات محاسبه EC خاک با استفاده از اطلاعات تصاویر ماهواره استر

Table 5- Equations for calculating soil EC using ASTER satellite imagery data

حالت طیفی Spectral mode	معادلهٔ خط Equation
DN	EC = (-0.604 × B2) + 66.63
Radiance	EC = (-0.34 × BI) + 68.51
Reflectance	EC = (-61.14 × NDVI) + 13.16

نقشهٔ شوری خاک، به‌دست آمده از اطلاعات ماهواره استر در حالت طیفی DN

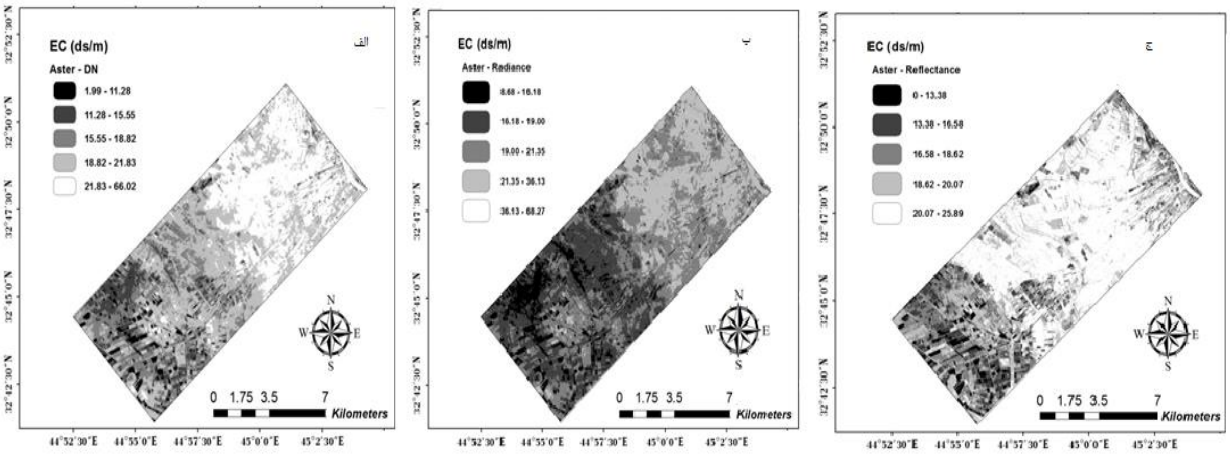
نقشهٔ پراکنش شوری خاک، تهیه شده از EC محاسبه شده از اطلاعات طیفی ماهواره استر در حالت طیفی DN در شکل ۳-الف ارائه شده است. با توجه به این نقشه بیشترین EC برآورد شده ۶۶/۰۲ دسی‌زیمنس بر متر است که به صورت نقاط سفید، بیشتر در نیمه شمالی منطقه، گسترش دارد و کمترین میزان EC برآورد شده ۱/۹۹ دسی‌زیمنس بر متر است که به صورت نقاط تیره در نیمهٔ جنوبی منطقه دیده می‌شود. دامنه EC به‌دست آمده از تصاویر ماهوارهٔ استر (۶۶/۰۲ – ۱/۹۹) از دامنهٔ EC اندازه‌گیری شده از سطح منطقهٔ مورد مطالعه (۳۹ - ۱۱ دسی‌زیمنس بر متر) گسترده‌تر است. همچنین، محدوده EC برآورد شده توسط ماهوارهٔ استر (شکل۳-الف) در حالت DN کمتر از محدوده EC محاسبه شده به وسیلهٔ ماهوارهٔ لندست (۸۴- ۰ دسی‌زیمنس بر متر) در حالت DN است. دامنهٔ EC برآورد شده در حالت DN ماهواره استر نسبت به EC برآورد شده از حالت DN ماهواره لندست به داده‌ای واقعی نزدیک‌تر است که نشان دهندهٔ بیشتر بودن دقت تصاویر ماهواره استر نسبت به ماهواره لندست در تخمین شوری سطح خاک در این مطالعه است. روند تغییرات شوری برآورد شده با ماهوارهٔ استر با روند تغییرات شوری برآورد شده به وسیلهٔ ماهوارهٔ لندست کاملاً همخوانی داشت.

نقشهٔ شوری خاک، به‌دست آمده از اطلاعات ماهوارهٔ استر در حالت طیفی radiance

با توجه به شکل ۳- ب مربوط به EC برآورد شده از تصاویر ماهوارهٔ استر در حالت طیفی radiance، بیشترین شوری برآورد شده ۶۷/۲۷ دسی‌زیمنس بر متر بود که به‌صورت نقاط روشن، بیشتر در نواحی نیمهٔ شمالی منطقه، پراکنش داشت و کمترین EC برآورد شده ۸/۶۸ دسی‌زیمنس بر متر بود که به صورت نقاط تیره، در نیمهٔ جنوبی پراکنده بود. دامنهٔ EC برآورد شده از تصاویر ماهوارهٔ استر در حالت radiance (شکل ۳- ب) کمتر از دامنهٔ EC برآورد شده به وسیلهٔ تصاویر ماهوارهٔ لندست در حالت radiance (شکل ۲- ج) بود، ولی در مقایسه با حالت DN ماهواره استر (شکل ۳- الف) ECهای بزرگتری را برآورد کرده بود. بیشتر شدن دامنه EC برآورد شده، توسط ماهوارهٔ استر با تغییر حالت از DN به radiance نشان دهندهٔ افزایش ارزش رقومی ثبت شده در حالت radiance است. علوی‌پناه و همکاران (Alavipanah, Matinfar, Sarmasti, Jafarbeglou & Goodarzimehr, 2011) در ارزیابی ماهوارهٔ استر در شناسایی شوری خاک گزارش کردند که تغییر حالت طیفی تصاویر این ماهواره از DN به radiance باعث افزایش دقت نقشه‌های تولیدی شد.

نقشهٔ شوری خاک، به‌دست آمده از اطلاعات ماهواره استر در حالت طیفی reflectance

نقشهٔ شوری برآورد شده از تصاویر ماهوارهٔ استر در حالت reflectance در شکل ۳- ج نمایش داده شده است، بر اساس این شکل بیشترین EC برآورد شده ۲۵/۸۹ دسی‌زیمنس بر متر بود که به صورت نقاط روشن بیشتر در نیمهٔ شمالی منطقهٔ وجود داشت. کمترین EC برآورد شده کمتر از ۱۳/۳۸ دسی‌زیمنس بر متر بود، که به صورت نقاط تیره، بیشتر در نیمهٔ جنوبی منطقه مشاهده شد. دامنه EC برآورد شده از حالت reflectance تصاویر ماهواره استر (EC EC= 0 – 25.89 dS/m) نسبت به تمام سه حالت مختلف تصاویر ماهواره لندست (شکل ۲) و دو حالت DN و radiance ماهوارهٔ استر (شکل ۳) کمتر بود. بر اساس دامنهٔ EC برآورد شده به دامنهٔ EC اندازه‌گیری شده در میان سه حالت طیفی مختلف ماهواره استر و ماهوارهٔ لندست حالت طیفی reflectance ماهوارهٔ استر بهترین حالت برای برآورد شوری خاک منطقهٔ مورد مطالعه به روش سنجش از دور است. پیکارزیک و همکاران (Piekarczyk, Kaźmierowski & Krolewicz, 2012) در بررسی ارتباط خصوصیات سطحی مزارع استان لوبوکسی، لهستان با خصوصیات طیفی بازتابی ماهواره استر بیان داشتند، که حالت طیفی reflectance دارای همبستگی بیشتری با داده‌های برداشت شده از سطح منطقه نسبت به دو حالت DN و radiance داشت.

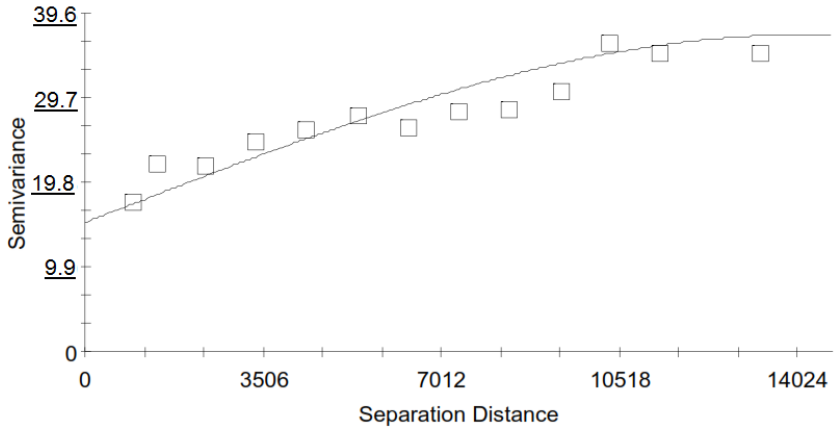


شکل ۳- نقشهٔ شوری خاک، برآورد شده از اطلاعات طیفی ماهواره استر در حالت الف- DN، ب- radiance، ج-reflectance

Fig. 3. Soil salinity map estimated from ASTER spectral data in modes: (a) DN, (b) radiance, (c) reflectance.

نقشهٔ شوری خاک، به روش زمین آمار

به منظور تشریح پیوستگی مکانی شوری در منطقه از آنالیز واریوگرام استفاده شد. مناسب‌ترین مدل واریوگرام برای میزان شوری مدل کروی به‌دست آمد. این مدل نشان می‌دهد که بخش ساختاردار واریوگرام شوری (C) بر بخش تصادفی (اثر قطعه‌ای C0) غلبه دارد. نسبت اثر قطعه‌ای (۱۳/۵) به آستانه (۳۷/۵) برابر با ۰/۳۶ به‌دست آمد که نشان می‌دهد تنها ۳۶ درصد از تغییرات واریانس از نوع تصادفی است و ۶۴ درصد از تغییرات شوری در منطقه ساختاردار است که حاکی از پیوستگی مکانی شوری در منطقه است و نشان می‌دهد که تراکم نمونه‌برداری برای استفاده از روش کریجینگ مناسب است و می‌تواند بخش غالب تغییرات شوری در منطقه را آشکار نماید (شکل ۴).

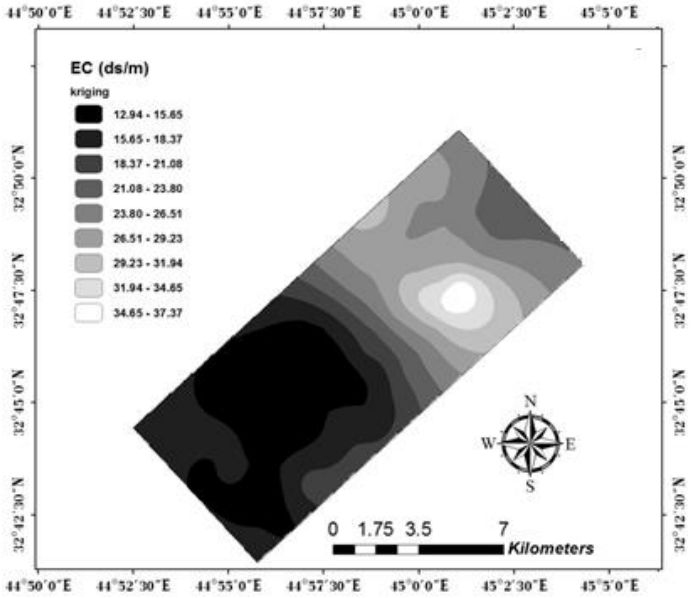


شکل۴- تغییرنمای همه جهته مقادیر هدایت الکتریکی

Fig. 4. Three-dimensional variation of electrical conductivity values

با استفاده از نتایج واریوگرام، کریجینگ نقشهٔ میان‌یابی شوری را در سطح منطقه، ارائه نمود (شکل۵). با توجه به این شکل، بیشترین EC خاک ۳۷/۳۷ دسی‌زیمنس بر متر بود، که به رنگ سفید در نیمهٔ شمالی منطقه نزدیک به رودخانهٔ دجله مشاهده شد و کمترین مقدار EC ۱۲/۹۴ دسی‌زیمنس بر متر بود، که به رنگ سیاه در نیمهٔ جنوبی منطقه وجود داشت. شورتر بودن اراضی نزدیک به رودخانه دجله احتمالاً به دلیل آبیاری طولانی مدت با آب شور رودخانهٔ دجله (۴ دسی‌زیمنس بر متر) و تبخیر زیاد این

منطقه و از طرفی نزدیک بودن عمق آب زیرزمینی (۲ متر) به سطح خاک، موجب شده تا نمک در سطح خاک تجمع پیدا کند و باعث شورتر شدن این قسمت از منطقهٔ مورد مطالعه شود. از طرف دیگر در اراضی جنوبی منطقه از سال ۲۰۰۰ میلادی سیستم زهکشی سطحی اجرا شده است، که باعث کاهش شوری این منطقه شده است. الفلاحی (Alfalahi, 2011) در بررسی شوری اراضی اطراف رودخانهٔ دجله گزارش کردند، عمق آب زیرزمینی در اراضی مرتعی اطراف رودخانه ۲ متر و در اراضی کشاورزی بین ۹۰ تا ۱۳۰ سانتی‌متر است، که بالا بودن عمق آب زیرزمینی یکی از دلایل شور شدن این اراضی گزارش شد.



شکل ۵- نقشهٔ پراکنش EC خاک، به روش زمین آمار

Fig. 5. Spatial distribution map of soil EC using geostatistical methods

اعتبار سنجی بین نقشه‌های تهیه شده به روش‌های مختلف

بر اساس شاخص‌های اعتبارسنجی میانگین خطای انحراف[1](MBE) و ریشهٔ دوم میانگین مربع خطا برای دو حالت DN و radiance برای لندست تفاوتی وجود ندارد ولی در حالت reflectance دارای خطای انحراف (MBE) کمتر (۱/۲۴-) و همچنین RMSE کمتری (۴/۵۸) نسبت به دو حالت طیفی دیگر است که می‌توان نتیجه گرفت که نقشهٔ شوری خاک، تهیه شده به وسیله حالت reflectance ماهواره لندست از دقت بیشتری برخوردار است. یوکسل و همکاران (Yüksel, Akay & Gundogan, 2008) در تبدیل تصاویر ماهواره‌ای از radiance به reflectance به این نتیجه رسیدند که این تبدیل طیفی باعث افزایش دقت و صحت اطلاعات برآورد شده از این تصاویر شد.

نتایج اعتبارسنجی EC محاسبه شده در سه حالت طیفی مختلف از تصاویر ماهواره استر (جدول ۶) نشان داد که کمترین مقدار (اختلاف از صفر) MBE در حالت طیفی DN (۱-) مشاهده شد. مقدار MBE دو حالت radiance و reflectance تقریباً برابر بودند و مقدار شاخص RMSE تقریباً برای تمام حالت‌های طیفی مختلف، مقدار ۱۶ بود. با توجه به نتایج اعتبارسنجی حالت‌های مختلف استر اختلاف چندانی دیده نمی‌شود. اعتبارسنجی روش طبقه‌بندی نظارت شده اگرچه نشان از بالاتر رفتن دقت مدل‌ها داشت ولی این افزایش چندان زیاد نبود.

1- Mean Bias Error

با مقایسهٔ پارامترهای اعتبارسنجی، نقشه‌های تهیه شده به روش سنجش از دور (لندست و استر) و روش زمین آمار (کریجینگ) (جدول ۶) متوجه می‌شویم که در میان نقشه‌های EC به‌دست آمده روش زمین آمار دارای کمترین MBE و RMSE است، که نشان دهندهٔ حداقل اختلاف بین EC برآورد شده به وسیلهٔ این روش با EC اندازه‌گیری شده است و در نتیجه دارای بیشترین دقت در تهیه نقشهٔ شوری خاک است.

جدول ۶- اعتبارسنجی حالت‌های مختلف طیفی ماهوارهٔ لندست و استر در تخمین ECe

Table 6- Validation of different spectral modes of Landsat and ASTER satellites in estimating ECe

Index	DN		Radiance		Reflectance		Kriging
	Landsat	Aster	Landsat	Aster	Landsat	Aster	
MBE	-1.38	-1.00	-1.41	-1.38	-1.24	-1.56	-0.06
RMSE	17	15.87	15.14	16.03	4.58	16.07	3.53

روش زمین آمار دارای دقت بیشتری برای تهیه نقشه‌های شوری خاک منطقهٔ مورد نظر بوده است. احتمالاً تنوع کاربری در منطقهٔ مورد نظر سبب شده تا گوناگونی طیفی در سطح منطقه، افزایش یابد و باعث افزایش خطا در تهیهٔ نقشهٔ شوری شود. علاوه بر این، در تهیهٔ نقشه‌های زمین آمار، ما از اطلاعات اندازه‌گیری شده استفاده می‌کنیم که باعث می‌شود تا دقت نقشه‌های تهیه شده از این روش نسبت به روش سنجش از دور بیشتر باشد. الدری و گارسیا (Eldeiry & Garcia, 2010) در مقایسهٔ روش‌های مختلف زمین آمار شامل کرجینگ معمولی، کرجینگ رگرسیون و کوکرجنگ به همراه روش سنجش از دور (لندست) جهت تخمین شوری در حوزهٔ رودخانه آرکانزاس، کلورادو، گزارش کردند که در بین روش‌های مورد استفاده روش کریجینگ معمولی بهترین عملکرد در تهیهٔ نقشهٔ شوری خاک نشان داد. تاجگردون و همکاران (Tajgardan, Ayoubi, Shataee & Sahrawat, 2010) در بررسی شوری اراضی استان گلستان، ایران به وسیله تصاویر ماهوارهٔ استر و مقایسه آن با روش‌های زمین آمار، گزارش کردند که از میان روش‌های محتلف زمین آمار و سنجش از دور (ماهواره استر) روش کریجینگ، رگرسیون دارای بیشترین دقت در تهیهٔ نقشه‌های شوری خاک بود. والرمن (Wallerman, 2003) نشان داد که مدلهای زمین آماری در مقیاس‌های محلی و مساحت‌های کم نسبت به روش‌های سنجش از دوری نتایج بهتری در تخمین خصوصیات خاک دارند. به طور کلی در روش زمین آمار، هرگاه مؤلفهٔ ساختاردار ویژگی مورد بررسی بر اثر قطعه‌ای غالب باشد دقت روش زمین آمار بالا خواهد بود که این امر وابستگی مستقیمی به وسعت منطقهٔ مطالعاتی و فاصلهٔ بین نقاط نمونه‌برداری دارد (Mahmoudabadi & Karimi, 2015). این مطالعه، نشان داد در مقیاس مورد بررسی روش کریجینگ نسبت به تمامی روش‌های مختلف سنجش از دوری و حالت‌های مختلف اطلاعاتی دو ماهواره استر و لندست از نظر دقت و صحت تولید نقشه شوری ارجحیت دارند.

نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور بررسی وضعیت شوری خاک در منطقه‌ای به وسعت ۱۰ هزار هکتار از اراضی آبرفتی رودخانهٔ دجله، که دارای کاربری کشاورزی بود، صورت گرفت. برای این منظور از روش‌های سنجش از دور و زمین آمار استفاده شد، که در روش سنجش از دور از اطلاعات دو ماهوارهٔ استر و لندست، در سه حالت طیفی radiance، reflectance و DN استفاده شد و برای روش زمین آمار از روش کریجینگ استفاده شد.

نتایج به‌دست آمده از کلیهٔ نقشه‌های شوری تهیه شده از روش سنجش از دور، به وسیله ماهواره‌های لندست و استر در حالت‌های مختلف طیفی نشان داد، که نیمهٔ جنوبی منطقهٔ مورد مطالعه نسبت به نیمهٔ شمالی منطقه که نزدیک به رودخانهٔ دجله بود دارای شوری کمتری بود. نقشه‌های به دست آمده از روش سنجش از دور با نتایج به دست آمده از نقشه شوری به دست آمده از روش زمین آمار، تقریباً پراکنش یکسانی نشان دادند به طوری که قسمت جنوبی منطقه، نسبت به شمال منطقه، دارای شوری کمتری در تمام روش‌ها بود، که این امر با واقعیت منطقه نیز تطابق داشت.

قسمت‌های جنوبی منطقهٔ مطالعاتی از سال ۲۰۰۰ تحت عملیات زهکشی سطحی قرار گرفته است، که باعث کاهش شوری خاک این منطقه شده است و نیمهٔ شمالی منطقهٔ مورد مطالعه که در مجاورت رودخانه دجله قرار دارد به دلیل آبیاری طولانی مدت با آب شور رودخانه دجله (۴ دسی‌زیمنس بر متر) و عدم زهکشی همچنان شوری آن بیشتر است.

مقایسهٔ انجام شده در این تحقیق بین روش زمین آمار و سنجش از دور در تهیه نقشه شوری نشان داد، که روش زمین آمار (کریجینگ) دارای دقت بیشتری در تهیه نقشه شوری خاک بود، احتمالاً به دلیل استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در روش زمین آمار، برای تهیه نقشه شوری خاک دقت نقشه‌های تولیدی را بالا برده است. روش سنجش از دور اگر چه نسبت به روش زمین آمار، به دلیل نمونه‌برداری کمتر، به صرفه‌تر است و همچنین به دلیل بررسی پیکسل به پیکسل منطقهٔ مورد مطالعه، نسبت به روش زمین آمار از قدرت تفکیک بالاتری برخوردار است. ولی این امکان وجود دارد، که به دلیل وجود خطاهای طیفی در تصاویر ماهواره‌ای، میزان شوری که از منطقه برآورد می‌شود با مقدار واقعی خیلی اختلاف داشته باشد، این در صورتی است که این خطا در روش زمین آمار کمتر وجود دارد.

حامی مالی

مقالهٔ حاضر با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد.

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله از حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد کمال تشکر و قدردانی را دارند (کد طرح ۴۷۶۴۴).

تضاد منافع نویسندگان

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

References

Abbas, A. H. (2010). *Units of North Kut Project and Prediction of Some Soil Physical Properties by Using GIS and Remote Sensing*. (PhD Thesis), College of Agriculture at University of Baghdad.

Abdulraheem, M. I., Zhang, W., Li, S., Moshayedi, A. J., Farooque, A. A., & Hu, J. (2023). Advancement of remote sensing for soil measurements and applications: A comprehensive review. *Sustainability*, *15*(21), 15444. https://doi.org/10.3390/su152115444

Alavi Panah, S. K. (2006). *Application of remote sensing in earth sciences*. Tehran: Tehran University Press. [in Persian]

Alavipanah, S. K., Matinfar, H. R., Sarmasti, N., Jafarbeglou, M., & Goodarzimehr, S. (2011). Evaluation of ASTER and LISS III data in identification of saline soils, case study: regions of Iran. *Geocomputation, London, UK*, 20-22.

Alfalahi, A. A., Qureshi, A. S., & Wu, W. (2015). Understanding the linkages between groundwater table depth, groundwater quality, soil salinity and crop production in Al-Musaib and Al-Dujaila Project areas of Iraq. https://hdl.handle.net/20.500.11766/8844

Al-Jeboory, S. R. J. (1987). *Effect of soil management practice on chemical and physical properties of soil from Great Musaib projects*. (PhD Thesis). University of Baghdad, College of Agriculture.

Al-Senafy, M., & Abraham, J. (2004). Vulnerability of groundwater resources from agricultural activities in southern Kuwait. *Agricultural Water Management*, *64*(1), 1-15. https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00195-1

Anderson, G. L., & Hanson, J. D. (1992). Evaluating hand-held radiometer derived vegetation indices for estimating above ground biomass. *Geocarto International*, *7*(1), 71-78. https://doi.org/10.1080/10106049209354354

Balasim, H., Al-Azzawi, M., & Rabee, A. (2013). Assessment of pollution with some heavy metals in water, sediments and Barbus xanthopterus fish of the Tigris River–Iraq. *Iraqi Journal of Science*, *54*(4), 813-822. https://ijs.uobaghdad.edu.iq/index.php/eijs/article/view/12332

Deschamps, P. Y., Herman, M., & Tanre, D. (1983). Definitions of atmospheric radiance and transmittances in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, *13*(1), 89-92.https://doi.org/10.1016/0034-4257(83)90029-9

Eldeiry, A. A., & Garcia, L. A. (2010). Comparison of ordinary kriging, regression kriging, and cokriging techniques to estimate soil salinity using LANDSAT images. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *136*(6), 355-364. https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000208

El-Harti, A., Lhissou, R., Chokmani, K., Ouzemou, J. E., Hassouna, M., Bachaoui, E. M., & El Ghmari, A. (2016). Spatiotemporal monitoring of soil salinization in irrigated Tadla Plain (Morocco) using satellite spectral indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *50*, 64-73. https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.03.008

Frenken, K. (2009). *Irrigation in the Middle East region in figures AQUASTAT Survey-2008*. Water Reports.

Gao, J. A. (1996). Modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, *82*, 303-310.

Hajizadeh, A., Nezam Mahalleh, M. A., Farzane, S., Rastegar, A., & Sydrzayy, H. (2013). *Intoduction to microwave remote sensing*. Satelite Publications. [in Persian]

Hammam, A. A., & Mohamed, E. S. (2020). Mapping soil salinity in the East Nile Delta using several methodological approaches of salinity assessment. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, *23*(2), 125-131. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.11.002

Iraq, F. A. O. (2012). *Agriculture Sector Note*. FAO: Rome, Italy.

Jabbar, M. T., & Zhou, J. (2012). Assessment of soil salinity risk on the agricultural area in Basrah Province, Iraq: Using remote sensing and GIS techniques. *Journal of Earth Science*, *23*(6), 881-891. https://doi.org/10.1007/s12583-012-0299-5

Kotenko, M. E., & Zubkova, T. A. (2008). The effect of the microrelief on salinization of semidesert soils. *Eurasian Soil Science*, *41*, 1033-1040. https://doi.org/10.1134/S1064229308100049

Mahmoudabadi, E., & Karimi, K. A. (2015). Mapping of calcium carbonate equivalent and clay content of surface soil using geostatistical methods (Case study: Chitgar park, Tehran). *Journal of RS and GIS for Natural Resource*, *3*(6), 73-85. [in Persian] https://sanad.iau.ir/journal/girs/Article/516799?jid=516799&lang=en

Mahmoodabadi, E., Karimi, A. R., Haghnia, G. H., & Sepehr, A. (2017a). Assessing Performance of Multivariate Linear Regression (MLR), artificial neural network (ANN) and Gene Expression Programming (GEP) in estimating soil. *Journal of Water and Soil Conservation*, *24*(2), 23-44. [in Persian] https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.11811.2633

Mahmoudabadi, E., Karimi, A., Haghnia, G. H., & Sepehr, A. (2017b). Digital soil mapping using remote sensing indices, terrain attributes, and vegetation features in the rangelands of northeastern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, *189*, 1-20. https://doi.org/10.1007/s10661-017-6197-7

Moyel, M. S., & Hussain, N. A. (2015). Water quality assessment of the Shatt al-Arab river, Southern Iraq. *Journal of Coastal Life Medicine*, *3*(6), 459-465. https://doi.org/10.12980/JCLM.3.2015J5-26

Panagiotou, C. F., Kyriakidis, P., & Tziritis, E. (2022). Application of geostatistical methods to groundwater salinization problems: A review. *Journal of Hydrology*, *615*, 128566. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128566

Pansu, M. (2006). *Handbook of soil analysis*. Springer.

Piekarczyk, J., Kaźmierowski, C., & Krolewicz, S. (2012). Relationships between soil properties of the abandoned fields and spectral data derived from the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER). *Advances in Space Research*, *49*(2), 280-291. https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.09.010

Qureshi, A. S., Ahmad, W., & Ahmad, A. F. A. (2013). Optimum groundwater table depth and irrigation schedules for controlling soil salinity in central Iraq. *Irrigation and Drainage*, *62*(4), 414-424. https://doi.org/10.1002/ird.1746

Srivastava, P. K., Srivastava, S., Singh, P., Gupta, A., & Dugesar, V. (2025). Soil chemical properties estimation using hyperspectral remote sensing: A review. *Earth Observation for Monitoring and Modeling Land Use*, 25-43.https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95193-7.00008-7

Sayler, K., & Zanter, K. (2024). *Landsat 7 Data Users Handbook*. USGS Landsat User Serv. https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-7-data-users-handbook

Tajgardan, T., Ayoubi, S., Shataee, S., & Sahrawat, K. L. (2010). Soil surface salinity prediction using ASTER data: Comparing statistical and geostatistical models. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, *4*(3), 457-467. http://oar.icrisat.org/id/eprint/8342

USGS. (2024). https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product

Wallerman, J. (2003). *Remote sensing aided spatial prediction of forest stem volume* (No. 271). (PhD Thesis), Swedish University of Agricultural Sciences. https://pub.epsilon.slu.se/190/1/91-576-6505-2.fulltext.pdf

Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists*. John Wiley & Sons. https://planninginsights.co.in/data/ebook/1622466729.pdf

Wiegand, C. L., Richardson, A. J., Escobar, D. E., & Gerbermann, A. H. (1991). Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sensing of Environment*, *35*(2-3), 105-119. https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90004-P

Yahiaoui, I., Douaoui, A., Zhang, Q., & Ziane, A. (2015). Soil salinity prediction in the Lower Cheliff plain (Algeria) based on remote sensing and topographic feature analysis. *Journal of Arid Land*, 7, 794-805. https://doi.org/10.1007/s40333-015-0053-9

Yale Center. (2022). https://yceo.yale.edu/how-convert-landsat-dns-top-atmosphere-toa-reflectance

Yüksel, A., Akay, A. E., & Gundogan, R. (2008). Using ASTER imagery in land use/cover classification of eastern Mediterranean landscapes according to CORINE land cover project. *Sensors*, *8*(2), 1237-1251. https://doi.org/10.3390/s8021287

Zarco-Tejada, P. J., Ustin, S. L., & Whiting, M. L. (2005). Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. *Agronomy Journal*, *97*(3), 641-653. https://doi.org/10.2134/agronj2003.0257

Vol.14, No.4, Winter 2025, p. 105-128 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94771.1601 OPEN ACCESS

Spatiotemporal Monitoring and Analysis of Snow Cover and Its Related Components in the Alborz Mountain Range

Vahid Safarian [1]*

[1] Assistant Professor in Climatology, Department of Climatology, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 23 July 2025

Revised: 23 September 2025

Accepted: 24 September 2025

Available Online:

27 September 2025

Keywords:

Spatiotemporal Analysis

Snow Cover

Normalized Difference Snow Index (NDSI)

MODIS

FLDAS

Alborz Mountain Range

ABSTRACT

This study aimed to analyze the temporal and spatial patterns of snow cover in the Alborz Mountains Range during the cold months, from December to April, over the period 2001–2024. Satellite data from the MODIS sensor and the FLDAS model were utilized within the Google Earth Engine platform, and the Normalized Difference Snow Index (NDSI) was applied to monitor snow cover. In addition, snow depth, snow water equivalent, and instantaneous snowfall rate were estimated and analyzed. The results showed that maximum snow cover was generally observed in January and February, with 2008 exhibiting the largest snow-covered area across all temporal scales (daily, monthly, and annual). In contrast, 2012 recorded the highest values for snow depth (21.70 cm), snow water equivalent (4.96 cm), and instantaneous snowfall rate (0.058 mm/h), indicating that intense snowfall events were concentrated in more localized areas that year. Temporal patterns were analyzed using a linear regression model, with coefficients of determination (R^2) of 0.037, 0.038, and 0.007 reported for snow depth, snow water equivalent, and instantaneous snowfall rate, respectively. These generally low values suggest that seasonal variability and atmospheric conditions play a more significant role than temporal trends in driving fluctuations in snow storage. Spatial assessments further indicated that the western, central, and northern highlands of the Alborz Mountains exhibited the highest snow accumulation, whereas the southern slopes, due to lower elevations and higher temperatures, displayed more scattered snow cover. This study highlights the importance of simultaneously monitoring multiple snow related variables to improve understanding of winter water resources and underscores the implications of climate change in Iran's mountainous regions.

* Corresponding author: Vahid Safarian E-mail address: V.Safarian@uok.ac.ir

How to cite this article: Safarian, V. (2025). Spatiotemporal Monitoring and Analysis of Snow Cover and Its Related Components in the Alborz Mountain Range. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 14*(4), 105-128. https://doi.org/10.22067/GEOEH.2025.94771.1601

©2025 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 one of the primary sources of streamflow in many regions, and an accurate understanding of its temporal and spatial patterns is essential for the optimal management of limited water resources (Soleimani et al., 2018). Variations in snow cover especially in areas with high spatial heterogeneity have significant impacts on ecosystem structure, soil characteristics, and vegetation diversity (Faraji et al., 2024). Given that snow is a key source of freshwater in many parts of the world, its continuous and precise monitoring holds particular importance in water resource studies (Ahmadi & Seyedmirzaei, 2022). This study seeks to identify snow cover trends across different time intervals through the analysis of satellite data and related modeling approaches.

Material and Methods

The aim of this study was to examine the temporal and spatial variations in snow cover and its associated parameters including snow depth, snow water equivalent (SWE), and instantaneous snowfall rate across the Iranian sector of the Alborz Mountain Range during the cold months (December, January, February, March, and April) from 2001 to 2024. To this end, daily remote sensing data (MODIS product) were used for NDSI, and modeled data from the FLDAS dataset were utilized for snow-related variables. Data processing was carried out using JavaScript within the Google Earth Engine environment, and statistical analyses were performed in Python.

Results and Discussion

The findings of this study regarding snow-covered area at three temporal scales daily, monthly average, and annual (with temporal uniqueness) indicate significant variability. At the daily scale, the largest snow covered areas occurred on a few specific days within the study period. These days and their corresponding snow covered extents are as follows: the highest snow covered area was observed on February 6, 2008, with 197,478 km²; followed by January 17, 2006, with 152,741 km²; and January 30, 2001, with 139,546 km². At the monthly average scale, the greatest snow-covered area was recorded in January, reaching 244,161.867 km². At the annual scale (based on temporal uniqueness), the year 2008 had the maximum snow-covered area of 343,435.132 km², while the minimum was observed in 2010, with an area of 138,759.11 km². However, the analysis of the three parameters mean snow depth, average snow water equivalent, and average snowfall intensity rate indicates that their highest values were recorded on specific winter days. The maximum average snow depth was observed on February 1, 2012, with a value of 21.70 cm; the highest average snow water equivalent was also recorded on the same day, at 4.96 cm; and the peak average instantaneous snowfall rate reached 0.058 mm per hour on February 1, 2012. The coefficients of determination (R^2) for temporal trends were low (ranging from 0.007 to 0.038), suggesting a weak role of time in explaining snow variability and emphasizing the importance of atmospheric, seasonal, and spatial factors.

Conclusion

The analysis of snow cover in the Alborz Mountain Range over the period 2001 to 2024, using daily, monthly, and annual data, revealed that snow variations do not follow a uniform pattern and have experienced significant fluctuations over time. At the annual scale, 2008 and 2010 were identified as notable years, with the highest and lowest snow-covered areas, respectively. Meanwhile, at daily and monthly scales, the greatest snow cover predominantly occurred in January and February, reflecting the concentration of snowfall during the winter season. Furthermore, the analysis of three key snow-related variables snow depth, snow water equivalent, and instantaneous snowfall rate revealed that their highest values were recorded in 2012. This indicates that the intensity and physical characteristics of snowfall in that year were notably significant, even though the snow-covered area was smaller compared to 2008. This discrepancy highlights the importance of a comprehensive, multifaceted examination of both qualitative and quantitative snow parameters. Although the snow-covered area peaked in 2008, the snow depth, snow

water equivalent, and instantaneous snowfall intensity were notably higher in 2012. This discrepancy is likely attributable to variations in the spatial distribution and intensity of snowfall. Statistical analyses and descriptive charts also indicate that the data distribution is right-skewed, with outliers observed primarily in the cold months, especially January and February. Positive correlations exist between snow depth and both snow water equivalent and snowfall rate, while these variables show a negative correlation with the progression of the months throughout the year, reflecting a gradual decline in snow characteristics during the warmer seasons.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، ص ۱۲۸-۱۰۵

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

دسترسی آزاد

DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94771.1601 مقاله پژوهشی

پایش و تحلیل زمانی- مکانی پوشش برف و مؤلفه‌های مرتبط با آن در پهنهٔ رشته‌کوه البرز

وحید صفریان[1*]

[1] استادیار اقلیم شناسی، گروه آب و هواشناسی، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲

کلمات کلیدی:

تحلیل زمانی- مکانی

پوشش برف

شاخص تفاضل نرمال شده پوشش برف (NDSI)

مودیس

مدل FLDAS

رشته کوه البرز

چکیده

این تحقیق با هدف تحلیل زمانی و مکانی پوشش برف در رشته‌کوه البرز در ماهای سرد سال از دسامبر تا آوریل طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ انجام شد. در این پژوهش از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده MODIS و مدل FLDAS در محیط تحت وب Google Earth Engine استفاده گردید و شاخص NDSI برای نظارت پوشش برف به‌کار گرفته شد. هم‌چنین متغیرهای عمق برف، آب معادل برف و نرخ بارش لحظه‌ای برف برآورد و تحلیل شدند. نتایج تحقیق نشان داد که حداکثر پوشش برف غالباً در ماه‌های ژانویه و فوریه مشاهده شد و سال ۲۰۰۸ بیش‌ترین پهنهٔ پوشش برف را در همه مقیاس‌های زمانی (روزانه، ماهانه و سالانه) به خود اختصاص داد. از سوی دیگر، سال ۲۰۱۲ دارای حداکثر مقدار عمق برف ۲۱/۷۰ سانتی‌متر، آب معادل برف ۴/۹۶ سانتی‌متر و نرخ بارش لحظه‌ای ۰/۰۵۸ میلی‌متر بر ساعت بود. این موضوع نشان دهندهٔ تمرکز بارش‌های شدید در بخش‌های محدودتر در این سال است. الگوهای زمانی با بهره‌گیری از مدل رگرسیون خطی مورد مطالعه قرار گرفت و مقادیر ضریب تعیین R^2 برای متغیرهای عمق برف، آب معادل برف و نرخ بارش لحظه‌ای به ترتیب ۰/۰۳۷، ۰/۰۳۸ و ۰/۰۰۷ گزارش شده‌اند. این مقادیر که اغلب پایین هستند، بیانگر آن می‌باشد که نوسانات فصلی و وضعیت جوی نقش مؤثرتری نسبت به زمان در نوسانات ذخایر برف ایفا می‌کنند. ارزیابی‌های مکانی نیز حاکی از آن بود که نواحی مرتفع غربی، مرکزی و شمالی البرز حداکثر تراکم برف را دارند، در حالی‌که دامنه‌های جنوبی به‌دلیل ارتفاع کم‌تر و دمای بالاتر، پوشش برفی پراکنده‌تری دارند. این پژوهش اهمیت ویژهٔ نظارت هم‌زمان متغیرهای مختلف برف را در شناخت بهتر از ذخایر آبی زمستان آشکار می‌سازد و پیامدهای تغییر اقلیم در مناطق کوهستانی ایران را نشان می‌دهد.

مقدمه

برف یکی از مؤلفه‌های کلیدی چرخه هیدرولوژیکی در حوضه‌های کوهستانی جهان به‌شمار می‌آید که به‌دلیل تأخیر در تبدیل به رواناب، نقشی متمایز در گردش آب ایفا می‌کند و از عوامل تأثیرگذار بر تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود. بارش‌های سنگین برف از جمله مخاطرات مهم جوی هستند که پیش‌بینی شدّت و گسترهٔ مکانی آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. اگرچه مناطق کوهستانی بخش محدودی از سطح زمین را در بر می‌گیرند، اما در چشم‌انداز هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز نقشی حیاتی ایفا می‌کنند. این اهمیت به‌ویژه در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک ایران نمود دارد، جایی که ذخایر برفی نواحی

* نویسندهٔ مسئول: وحید صفریان E-mail: V.Safarian@uok.ac.ir

مرتفع، نقشی بنیادی در تأمین آب برای مصارف کشاورزی، شرب و نیازهای اکولوژیکی ایفا می‌کنند و به‌مثابه ذخیره‌ای راهبردی در مدیریت بحران آب تلقی می‌شوند. از این رو، اطلاعات دقیق دربارهٔ پوشش برف که در تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی و برنامه‌ریزی منابع آبی نقش دارد، برای مدیریت پایدار این منبع اساسی ضروری می‌باشد. از میان روش‌ها و منابع موجود، داده‌های ماهواره‌ای MODIS[1] به‌دلیل پوشش گسترده، پیوستگی زمانی و قابلیت تفکیک مناسب، ابزاری کارآمد برای پایش سطح پوشش برف به‌شمار می‌روند (Abbasi Jandani & Fathzadeh, 2015; Ghafarian et al., 2016; Roustayi, Rahimpour & Nokhostin Rouhi, 2016; Ebrahimi, Hamzeh & Marofi, 2016; Abdam, Fathzadeh, Taghizadeh Mehrjardi & Mahjoubi, 2016; Haghizadeh, Kiani & Kiani, 2017; Kashki & Haji Mohammadi, 2017; Tasdighian & Rahimzadegan, 2017; Montazeri, 2018).

برف یکی از عوامل کلیدی در جریان آب در بسیاری از مناطق به‌شمار می‌رود و شناخت دقیق الگوی زمانی و مکانی آن برای مدیریت بهینهٔ منابع محدود آبی امری ضروری است (Solaimani, Darvishi, Shokrian & Rashidpour, 2018). تغییرات پوشش برف، به‌ویژه در نواحی با پراکندگی مکانی بالا، تأثیرات چشم‌گیری بر ساختار زیست‌بوم‌ها، ویژگی‌های خاک و تنوع پوشش گیاهی برجای می‌گذارد (Faraji, Kamangar & Ashrafi, 2024). از آن‌جا که برف یکی از مهم‌ترین منابع آب شیرین در بسیاری از نقاط جهان است، بررسی دقیق و مستمر آن اهمیت ویژه‌ای در مطالعات ذخایر آبی دارد (Ahmadi & Seyedmirzaei, 2022) . در این میان، تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط زیست عصر حاضر، تأثیر مستقیمی بر فرآیندهای طبیعی مانند ذوب یخچال‌ها و تجمع برف دارد. پایش دقیق این پدیده‌ها از طریق فناوری‌های سنجش از دور و بهره‌گیری از حسگرهای ماهواره‌ای مانند AVHRR[2]، MODIS، GEOS[3] و MERIS[4] امکان‌پذیر شده است که قابلیت ارزیابی جامع و مستمر برف در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی را فراهم می‌سازد (Seydi Shahivandi, Omidvar, Mozafari & Mazidi, 2025). در مناطق مرتفع، برف یکی از ارکان بنیادین چرخهٔ آب‌شناسی به‌شمار می‌آید؛ چرا که با ذخیره‌سازی آب در فصل زمستان و آزادسازی تدریجی آن در ماه‌های گرم‌تر، نقشی اساسی در تأمین منابع آبی بخش‌هایی مانند کشاورزی، صنعت، منابع سطحی آب و مصرف شهری ایفا می‌کند. پوشش برف در حوضه‌های رودخانه‌ای، به‌طور مستقیم بر میزان رطوبت سطحی خاک تأثیر می‌گذارد و از این طریق، در شکل‌گیری رواناب و شدت آن نقش مؤثری دارد. این پیوند بین برف، رطوبت خاک و رواناب، اهمیت پایش دقیق و مستمر پوشش برفی را در مطالعات ذخایر آبی و مدیریت سیلاب دوچندان می‌سازد (Ozdogan, 2011; Tekeli & Tekeli, 2012; Berezowski, Chormanski & Batelaan, 2015) . رشته‌کوه البرز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نواحی کوهستانی ایران، نقش مهمی در فراهم کردن منابع آب شیرین کشور ایفا می‌کند. این منطقه با ارتفاعات متنوع و پراکندگی مکانی بارش‌های برفی، منبع اصلی ذخیرهٔ آب در فصل زمستان و پاییز می‌باشد. در ایران به دلیل پراکندگی نواحی برفی و محدودیت دسترسی به داده‌های زمینی، استفاده از داده‌های سنجش از دور مانند MODIS با پوشش گسترده و پیوستگی زمانی بالا، و مدل‌های سطح زمین مانند FLDAS، امکان پایش مستمر و دقیق پوشش برف در مقیاس‌های روزانه، ماهانه و سالانه را فراهم می‌آورد. ترکیب این داده‌ها با تحلیل‌های مکانی و زمانی، نه تنها امکان شناسایی روندهای بلندمدت پوشش برف را می‌دهد، بلکه به درک بهتر ارتباط بین تغییرات اقلیمی و ذخایر برفی منطقه نیز کمک می‌کند.

مرور ادبیات موضوع و پیشینهٔ تحقیق، نشان‌دهندهٔ گستردگی و تنوع مطالعات انجام‌شده در زمینه پایش مساحت پوشش برف و سنجش‌های مربوط به آن است. این تنوع، نشان‌دهندهٔ توجه و اهمیت بالای این موضوع در محافل علمی و اجرایی می‌باشد. در پیشینهٔ این پژوهش، مطالعات متعددی بررسی شده است که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از: سلیمانی و همکاران (Solaimani et al., 2018) با استفاده از تصاویر MODIS، تغییرات زمانی و مکانی پوشش برف در استان کردستان را پایش کردند. نتایج نشان داد بیش‌ترین وسعت پوشش برف در دی‌ماه ۱۳۸۶ با مساحت ۲۸۹۱۴/۲ کیلومتر مربع رخ داده است. یاراحمدی و همکاران (Yarahmadi, Fathnia & Sherafat, 2020) با استفاده از تصاویر NOAA[5]-AVHRR به ارزیابی دمایی

1- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
2- Advanced Very High-Resolution Radiometer
3- Goddard Earth Observing System
4- Medium Resolution Imaging Spectrometer
5- National Oceanic and Atmospheric Administration

خط برف و شناسایی مناطق دارای پتانسیل ریزش برف در کوه‌های البرز پرداختند. نتایج نشان داد طی دورهٔ مورد مطالعه، بیش‌ترین وسعت پوشش برف در آوریل ۲۰۱۵ به میزان ۱۲۰۵۹ کیلومترمربع و کم‌ترین آن در ژوئن ۲۰۰۸ با ۳۳ کیلومترمربع ثبت شده است. عالی‌نژاد و همکاران (Aalinejad, Jahanbakhsh & Mohammad Khorshiddoust, 2021) با استفاده از مدل SRM[1]، رواناب ناشی از ذوب برف را در حوضهٔ قره‌سو شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد سهم ذوب برف در جریان رودخانه طی اسفند و فروردین قابل‌توجه بود، اما در اردیبهشت‌ماه با افزایش دمای هوا، نقش بارش در تولید رواناب غالب می‌شود. سیفی (Seifi, 2021) با بهره‌گیری از تکنیک‌های شیءگرا و تصاویر سنجنده‌های OLI[2] و TIRS[3]، سطح پوشش برف در کوهستان سبلان را برآورد کرد. نتایج نشان داد مساحت پوشش برف در این محدوده، برابر با ۲۱۴۲/۶۲ کیلومتر مربع بوده است. عبادی و همکاران (Ebadi, Eftekhary, Mohammad Khanlu & Fakhri, 2021) شاخص طیفی جدیدی را برای استخراج سطوح برفی با استفاده از تصاویر اپتیکی سنجش از دور ارائه کردند. ارزیابی شاخص با معیارهای ضریب کاپا و صحت کلی نشان داد شاخص پیشنهادی از دقت بالایی برخوردار است (ضریب کاپای ۱ برای تصویر لندست ۸ منطقه اصلی، و ۰/۹۶ برای منطقه ارزیابی ۱) و توانایی مناسبی در تفکیک برف از سایر پدیده‌ها دارد. مطیعی و احراری (Motiee & Ahrari, 2022) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست در سامانه گوگل ارث انجین، روند تغییرات پوشش برف منطقه تخت سلیمان را بررسی کردند. نتایج نشان داد پوشش برف و یخچال‌های این منطقه در خرداد از ۱۲۷ کیلومترمربع در سال ۱۹۹۰ به ۲۲ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۱ کاهش ۸۰ درصدی داشته است. احمدی و سید میرزایی (Ahmadi & Seyedmirzaei, 2022) با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS، تغییرات پوشش برف در دوره سرد سال ایران را پایش کردند. نتایج نشان داد بیش‌ترین پوشش برف مربوط به ماه ژانویه با ۱۵/۱۶ درصد و کم‌ترین آن مربوط به ماه اکتبر با کم‌تر از ۱ درصد است. مریانجی و همکاران (Maryanji, Toulabi Nejad & Dolatshahi, 2023) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارش برف و پیش‌بینی آن در شهرستان همدان پرداختند. نتایج شاخص NDSI[4] نشان داد پوشش برف در همدان کاهش یافته و از ۲۰ درصد مساحت کل شهرستان به ۷ درصد در دههٔ اخیر رسیده است. فرجی و همکاران (Faraji et al., 2024) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، تحلیل فضایی پوشش برف در غرب ایران را انجام دادند. نتایج نشان داد جهت بیضی پراکندگی برف در راستای شمال‌غربی ـ جنوب‌شرقی بوده و مطابق آرایش ارتفاعات گسترش یافته است. صیدی‌شاهیوندی و همکاران (Seydi-Shahivandi et al., 2025) به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر ویژگی‌های برف‌پوشان زاگرس میانی با استفاده از داده‌های سنجش از دور پرداختند. تحلیل روند پوشش برف در فصول مختلف بر اساس تصاویر MODIS نشان داد که اکثر مناطق، به‌ویژه نواحی مرتفع، دارای روند کاهشی معنی‌دار هستند؛ با این حال، در نواحی غربی و جنوب‌غربی، روند کاهشی قابل توجهی مشاهده نشد. جین و همکاران (Jin, Ke, Xu & Li, 2015) روند پوشش برف در فلات لُوِس چین را بررسی کردند و دریافتند که فقط در ۷/۱۶ درصد از این منطقه کاهش معنادار در تعداد روزهای برف‌پوش رخ داده است. ایران‌نژاد و همکاران (Irannezhad, Ronkanen & Kløve, 2016) عوامل کنترل اقلیم زمستان و کاهش بارش برف را در سه ایستگاه فنلاند بررسی کردند. نتایج نشان داد که کاهش بارش زمستانی با شاخص‌های اطلس شرقی- روسیه غربی، نوسان قطبی و آرام غربی مرتبط است و افزایش دما تا ۴ درجه در این قرن نیز تأثیرگذار بوده است. عاطف و همکاران (Atif, Mahboob & Iqbal, 2015) روند تغییرات گستره پوشش برف در بالادست حوضهٔ ایندوس را از ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳ بررسی کردند و متوجه شدند که تغییر معناداری در گسترهٔ برف رخ نداده است. داریان و همکاران (Dariane, Santi & Amin, 2017) سطح برف در منطقهٔ کوهستانی البرز مرکزی را طی ۱۳ سال مطالعه کردند و کاهش قابل توجهی در سطح برف مشاهده کردند. دی مارکو و همکاران (Di Marco et al., 2021) با استفاده از داده‌های پوشش برفMODIS و مدل ذوب برف مبتنی بر تابع توزیع توپوگرافی، عدم قطعیت مدل‌سازی هیدرولوژیکی را کاهش دادند. در خروجی حوضهٔ اصلی نسبت پوشش‌دهی ۰/۵۴ و میانگین تیزی ۰/۱۱ و در حوضهٔ فرعی (منطقه اعتبارسنجی) به‌ترتیب ۰/۰۶۵ و ۰/۱۷ به‌دست آمد.

1- Snow Reflectance Model
2- Operational Land Imager
3- Thermal Infrared Sensor
4- Normalized Difference Snow Index

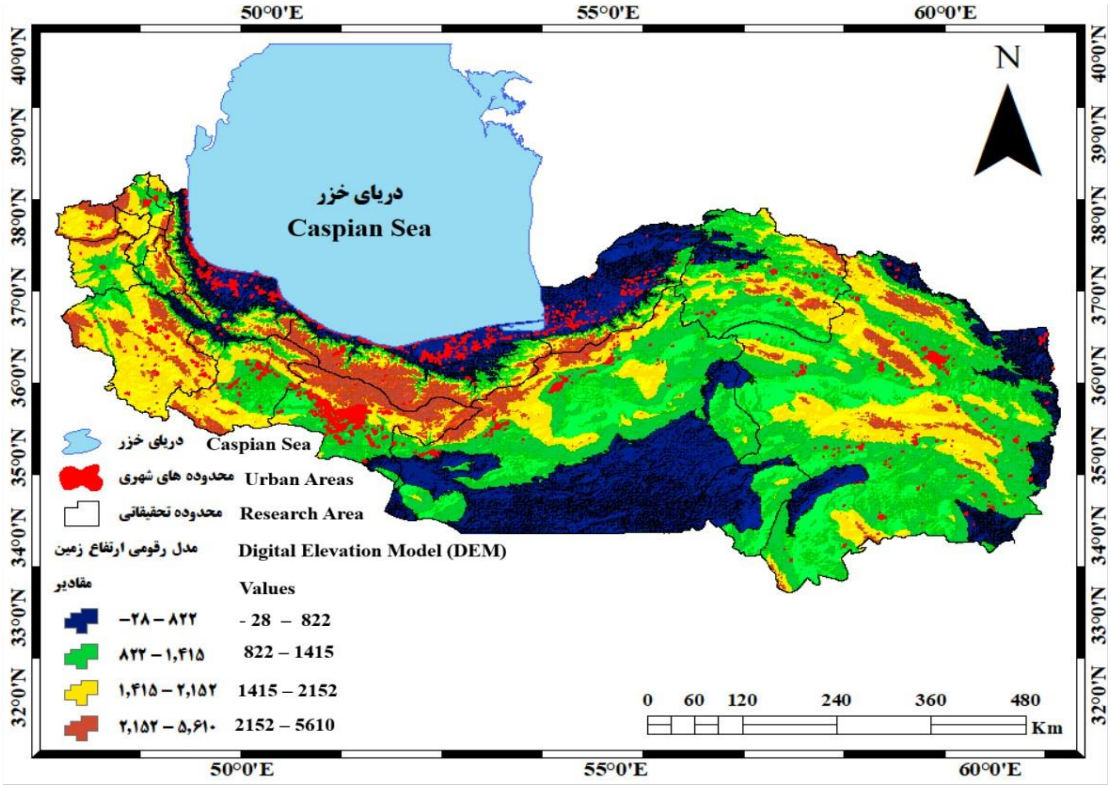
این نتایج نشان‌دهندۀ توان بالای نقشه‌های MODIS در بهبود کالیبراسیون مدل‌های هیدرولوژیکی و کاهش عدم قطعیت شبیه‌سازی دبی جریان است. وی و همکاران (Wei et al., 2021) با استفاده از داده‌های سنجش از دور و عوامل محیطی، داده‌های عمق برف با وضوح مکانی یک کیلومتر را برای فلات چین - تبت بازسازی کردند. نتایج نشان داد تعداد روزهای پوشش برف و پارامترهایی چون طول و عرض جغرافیایی، شیب و نوسانات سطحی، تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر عمق برف دارند. بازسازی عمق برف دقت مناسبی با RMSE برابر ۲/۲۶ سانتی‌متر نسبت به داده‌های میدانی داشت. پاسانگ و همکاران (Passang, Schmidt & Nüsser, 2022) تأثیر توپوگرافی بر توزیع پوشش برف در منطقه فرا هیمالیا (Trans-Himalaya) لداخ، هند را بررسی کردند. میانگین سالانه پوشش برف حدود ۴۲ درصد بود که از ۱۵ درصد در ماه اوت تا ۷۱ درصد در فوریه متغیر مشاهده شد. حسین و همکاران (Hussain et al., 2023) کاهش مساحت پوشش برف در دره‌های پاسو و غلکین را بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۲ بررسی کردند. نتایج نشان داد پوشش برف این مناطق به طور متوسط سالانه ۰/۴۲ کیلومترمربع کاهش یافته و مجموع کاهش در دورۀ مذکور حدود ۱۱/۴۶ کیلومترمربع بوده است. سونیتا و همکاران (Sunita et al., 2023) با استفاده از داده‌های MODIS و ERA5[1] به تحلیل پوشش برف و عوامل اقلیمی در حوضۀ رودخانه بیاس (هیمالیای غربی) پرداختند. نتایج نشان داد میانگین مساحت پوشش برف حدود ۵۶ درصد از کل منطقه است، که بیش‌ترین مقدار سالانه آن با حدود ۶۱/۸۴ درصد در سال ۲۰۱۴ و کم‌ترین مقدار آن با حدود ۴۹/۲ درصد در سال ۲۰۱۶ به دست آمد. بانرجی و همکاران (Banerjee, Sati, Almazroui & Chakraborty, 2024) به ارزیابی پراکندگی مکانی- زمانی و حجم پوشش برف در هیمالیای مرکزی با شاخص NDSI پرداختند. نتایج نشان داد پوشش برف ضخیم تا سال ۲۰۰۶ نوساناتی همراه با روند کاهشی داشته، سپس افزایشی خفیف داشته و در سال ۲۰۲۱ دوباره کاهش یافته است. دیکسیت و همکاران (Dixit, Goswami, Jain & Das, 2024) الگوهای پوشش برف در حوضه‌های رودخانه‌ای ایندوس، گنگ و برهماپوترا را با شاخص‌های پایداری و خط برف بررسی کردند. نتایج، نشان‌دهندۀ نوسانات قابل توجه پوشش برف در مناطق اقلیمی و فصول مختلف بوده است. گرمایش جهانی تأثیر واضحی بر انتقال پوشش برف از مناطق دائمی و فصلی به مناطق پراکنده یا فاقد برف دارد. شیائو و لیانگ (Xiao & Liang, 2024) الگوریتم‌های نقشه‌برداری پوشش برف با استفاده از داده‌های بازتاب سطحی لندست را ارزیابی و کاربرد آن‌ها را در تعیین خودکار خط برف بررسی کردند. نتایج نشان داد اختلاف ارتفاع خط برف میان هشت الگوریتم نسبت به ارتفاع مرجع قابل توجه است؛ که میانگین ارتفاع خط برف بین ۱۲۱ تا ۲۵۸ متر، پایین‌ترین ۱۰ درصد بین ۲۵۳ تا ۵۱۲ متر و بالاترین ۱۰ درصد بین ۲۰۶ تا ۳۴۴ متر متغیر بود. گائو و همکاران (Gao, Liu, Han & Zhang, 2024) روند زمانی و مکانی پوشش برف در سه استان شمال‌شرق چین را با داده‌های MODIS عاری از ابر بررسی کردند. نتایج نشان داد میانگین سالانه درصد پوشش برف تا سال ۲۰۰۹ با نرخ ۱/۲۷ درصد در سال افزایش و پس از آن با نرخ ۱/۸۰ درصد در سال کاهش یافته است. خان و لی (Khan & Li, 2025) روند پوشش برف جهانی را از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ با داده‌های MODIS بررسی کردند، نتایج نشان داد میانگین سالانه SCF[2] به طور متوسط سالانه ۰/۰۳۷ - درصد در حال کاهش است.

با توجه به بررسی مطالعات پیشین در ایران و سایر مناطق نشان می‌دهند که پایش پوشش برف و پارامترهای مرتبط دارای محدودیت‌هایی می‌باشد که از جمله آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: بسیاری از تحقیقات تنها بخش‌هایی از رشته‌کوه البرز یا سایر مناطق را مورد بررسی قرار داده‌اند و تحلیل جامع منطقه‌ای ارائه نشده است، تمرکز اکثر مطالعات بر مساحت پوشش برف بوده و پارامترهای مرتبط مانند عمق برف، آب معادل ذوب برف و نرخ لحظه‌ای بارش کم‌تر مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و یکپارچگی داده‌های سنجش از دور و مدل‌سازی سطح زمین (MODIS و FLDAS) و تحلیل هم‌زمان چند پارامتر به ندرت در مطالعات پیشین انجام شده است. هدف از تحقیق حاضر به بررسی الگوهای زمانی و فضایی پوشش مساحت برف در پهنۀ رشته کوه البرز با استفاده از داده‌های سنجش از دور در محیط سامانه تحت وب گوگل ارث انجین با پوشش کامل منطقه، تحلیل چند پارامتر مرتبط با برف و استفاده از داده‌های یکپارچه، درصدد پر کردن این شکاف‌ها و ارائه تصویری جامع از روندهای مکانی و زمانی پوشش برف در رشته‌کوه البرز می‌باشد.

1- ECMWF Reanalysis
2- Snow Cover Frequency

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف ارزیابی و تحلیل روند تغییرات زمانی و مکانی پوشش برف در گسترهٔ ایرانی رشته‌کوه البرز، به‌منظور شناخت الگوهای فضایی–زمانی آن طی ماه‌های سرد سال (دسامبر تا آوریل) انجام شده است. محدودهٔ مورد مطالعه، با مساحت دقیق ۳۹۵۲۸۱/۳۸۰۸۱۱ کیلومتر مربع، در قلمرو جغرافیایی ایران واقع شده است (شکل ۱). برای اجرای این تحلیل، از داده‌های سنجش از دور و داده‌های جوی در محیط پردازشی GEE[1] استفاده گردید. بازهٔ زمانی بررسی، سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ را شامل می‌شود و تمرکز اصلی بر ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه، مارس و آوریل بوده است؛ ماه‌هایی که بیش‌ترین احتمال وقوع و گسترش پوشش برف در منطقه وجود دارد.



شکل ۱– نقشه محدودهٔ تحقیقاتی

Fig. 1. Map of Study Area

در این تحقیق، به منظور شناخت وضعیت آمار توصیفی پارامترهای مورد مطالعه و بررسی همبستگی میان میانگین متغیرهای عمق برف، آب معادل برف و نرخ بارش لحظه‌ای، اقدام به ترسیم نمودارهای آماری و انجام تحلیل‌های سری زمانی شده است. برای اجرای این تحلیل‌ها از نسخه ۳.۱۲.۲ زبان برنامه‌نویسی Python بهره گرفته شد. کتابخانه‌های تخصصی و کارآمدی هم‌چون پانداس[2] برای مدیریت و پردازش داده‌های جدولی (دیتافریم)، نامپای[3] برای محاسبات عددی و ماتریسی، و مت‌پلات‌لیب[4] برای بصری‌سازی و تجسم داده‌ها به‌منظور تسهیل تحلیل‌های آماری و نمایشی داده‌ها در این پژوهش به‌کار گرفته شدند. در این تحقیق، متغیرهای وابسته به برف شامل مساحت پوشش برف، عمق برف، آب معادل ذوب برف و نرخ بارش لحظه‌ای برف مورد تحلیل قرار گرفتند. در پژوهش حاضر، ابتدا با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای و پیاده‌سازی آن‌ها از طریق

1- Google Earth Engine
2- Pandas
3- Numpy
4- Matplotlib

کدنویسی در محیط GEE و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی JavaScript API[1]، واحدهای پارامترهای اولیه موجود در پروداکت‌های ماهواره‌ای به واحدهای رایج مورد استفاده در تحقیقات اقلیم‌شناسی تبدیل شدند (جدول ۱). این تبدیل با هدف بهبود مقایسه بین پارامترها و افزایش دقت در محاسبه همبستگی میان آن‌ها انجام گرفت. در ادامه، تحلیل‌های مورد نظر بر اساس داده‌های یکپارچه‌شده انجام شد.

جدول ۱- تبدیل واحد متغیرهای برفی

Table 1 - Unit Conversion of Snow Variables

پارامترها Parameters	واحد اولیه Primary Unit	واحد تبدیل شده برای تحلیل Converted Unit for Analysis
عمق برف Snow Depth	M	cm
آب معادل ذوب برف Snow Water Equivalent	kg/m^2	cm
نرخ بارش برف لحظه‌ای Instantaneous Snowfall Rate	kg/m^2/s	mm/hr

در این مطالعه، برای استخراج مساحت پوشش برفی، از داده‌های مشاهده شده شاخص تفاضل نرمال‌شده برف (NDSI[2]) استفاده شد. پارامتر NDSI_SC[3] که نمایان‌گر درصد پوشش برف در هر پیکسل است، از محصول روزانه MODIS/061/MOD10A1 با دقت مکانی ۵۰۰ متر استخراج گردید. این داده‌ها به دلیل رزولوشن نسبتاً بالا و پوشش زمانی مناسب، امکان پایش دقیق تغییرات مکانی و زمانی پوشش برف را فراهم می‌کنند. شاخص NDSI برای شناسایی و تفکیک نواحی پوشیده از برف محاسبه شده است. این شاخص بر اساس ترکیب بازتاب‌های باند سبز (Green) و مادون قرمز کوتاه‌موج (SWIR[4]) تصاویر ماهواره‌ای طبق رابطه (۱) تعیین می‌شود:

$$NDSI = \frac{MODIS_{Band4} - MODIS_{Band6}}{MODIS_{Band4} + MODIS_{Band6}} = \frac{green - SWIR}{green + SWIR} \quad (۱)$$

برای تفکیک نواحی برفی از سایر پوشش‌های سطح زمین، آستانه‌ای برابر با ۴۰[5] (در مقیاس ۰ تا ۱۰۰ درصد پوشش برف) در نظر گرفته شد. این مقدار بر اساس مطالعات پیشین به‌عنوان حد مناسب برای تشخیص پوشش برف تازه تعیین شده است (Hall, Riggs & Salomonson, 2002). با اعمال این آستانه، نقشه‌های دودویی برف/ غیر برف تولید و مساحت نواحی برفی در بازه‌های زمانی مختلف محاسبه گردید. تمامی مراحل پردازش تصاویر، اعمال آستانه و محاسبه مساحت پوشش برف در سه مقیاس روزانه، میانگین ماهانه و سالانه (با یکتای زمانی) در محیط (GEE) انجام شد.

در این تحقیق، برای برآورد عمق برف[6]، آب معادل ذوب برف[7] و نرخ بارش لحظه‌ای برف[8] (در هر ساعت، بر روی هر متر مربع زمین، چند کیلوگرم برف باریده است)، از داده‌های مدل‌سازی‌شده سامانه‌ی FLDAS[9] استفاده شد. داده‌های این سامانه حاصل اجرای مدل فیزیکی NOAH (LSM[10]) بوده که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مشاهدات زمینی مختلف، مجموعه‌ای منسجم از پارامترهای سطح زمین را تولید می‌کند. مزایای کلیدی داده‌های FLDAS شامل پوشش زمانی پیوسته، مقاومت در برابر اختلال ناشی از پوشش ابری، نبود شکاف‌های زمانی در داده‌ها و دقت بالای مدل در بازنمایی فرآیندهای سطحی است.

1- Application Programming Interface
2- Normalized Difference Snow Index
3- NDSI_Snow_Cover
4- Shortwave Infrared
5- NDSI_Snow_Cover > 40
6- Snow Depth_inst
7- SWE_inst
8- Snowf_tavg
9- Famine Early Warning Systems Network Land Data Assimilation System
10- Land Surface Model

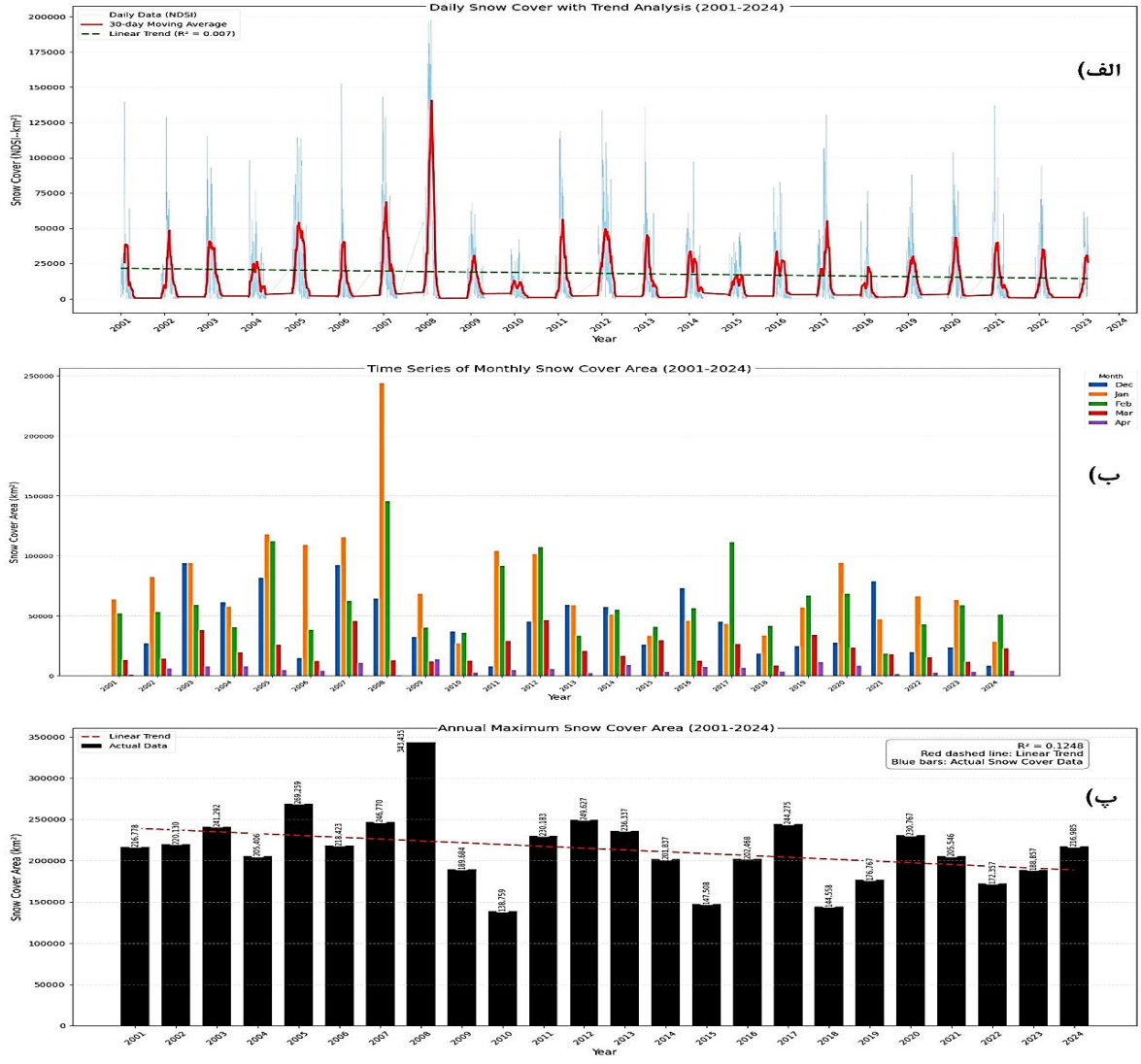
این ویژگی‌ها باعث می‌شود داده‌های FLDAS گزینه‌ای مناسب برای مطالعات اقلیمی و بلندمدت در مقیاس منطقه‌ای، از جمله ارزیابی روندهای برف، باشند (McNally et al., 2017). هم‌چنین به‌منظور درک بهتر رفتار آماری سه متغیر کلیدی مرتبط با برف شامل عمق برف، آب معادل برف و نرخ لحظه‌ای بارش برف مجموعه‌ای از تحلیل‌های گرافیکی شامل هیستوگرام[1]، نمودار پراکنش[2]، باکس‌پلات[3] و بارپلات[4] در مقیاس میانگین ماهانه انجام شد.

نتایج و بحث

در پژوهش حاضر، پایش تغییرات زمانی و مکانی پوشش برف و پارامترهای مرتبط آن شامل: عمق برف، آب معادل برف و نرخ لحظه‌ای بارش در منطقه تحقیقاتی رشته‌کوه البرز طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ به‌طور جامع مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل‌های انجام شده در بازه‌های روزانه، ماهانه و سالانه (با یکتای زمانی) با استفاده از روش‌های آماری توصیفی و همبستگی، امکان شناسایی روندهای اقلیمی و اثرات نوسانات آب‌وهوایی بر چگونگی تغییرات زمانی و مکانی پوشش برف را فراهم آورد. نتایج بررسی‌ها و تجزیه و تحلیل‌های مذکور، با بازنمایی‌های نموداری و گرافیکی ارائه شد. در ادامه، خلاصه‌ای فشرده از یافته‌های پژوهش و خروجی‌های به‌دست‌آمده از این بررسی‌ها و تحلیل‌ها ارائه می‌گردد. یافته‌های تحقیق حاضر در مساحت پوشش برف در سه مقیاس روزانه، میانگین ماهانه و سالانه (با یکتای زمانی) حاکی از آن می‌باشد. در مقیاس روزانه نشان می‌دهد که بیش‌ترین مساحت پوشش برف در چند روز مشخص در بازهٔ زمانی مورد مطالعه رخ داده است. این روزها و مساحت‌های مربوط به آن بدین شرح می‌باشند: بیش‌ترین مساحت پوشش برف به ترتیب مربوط به روز ششم فوریه با مقدار ۱۹۷۴۷۸/۱۸۸ کیلومتر مربع، روز پنج فوریه با مقدار ۱۹۶۳۹۲/۳۷ کیلومتر مربع و روز هجده ژانویه با مقدار ۱۹۵۷۳۶/۵۹۳ کیلومتر مربع)، در سال ۲۰۰۸؛ روز هفدهٔ ژانویه با مقدار ۱۵۲۷۴۰/۵۱ کیلومتر مربع در سال ۲۰۰۶ و روز ۳۰ ژانویه با مقدار ۱۳۹۵۴۶/۳۵۴ کیلومتر مربع در سال ۲۰۰۱ به دست آمد (شکل الف –۲). اکثر روزها با بیش‌ترین پوشش برف در ماه‌های ژانویه و فوریه قرار دارند که با الگوی طبیعی بارش برف در فصل زمستان در رشته‌کوه البرز همخوانی دارد. این ماه‌ها سردترین بازهٔ زمانی سال بوده و شرایط لازم برای حفظ و گسترش برف فراهم است. سال ۲۰۰۸ بیش‌ترین مساحت پوشش برف را در مقیاس روزانه در چند روز متوالی ثبت کرده است که این موضوع می‌تواند نشان‌دهندهٔ شرایط خاص اقلیمی یا نوسانات جوی آن سال باشد. این موضوع می‌تواند به عوامل مختلفی مانند افزایش بارش برف، کاهش دما یا ترکیبی از هر دو مرتبط باشد. مقادیر مساحت پوشش برف در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۶ به نسبت سال ۲۰۰۸ پایین‌تر است، که این تفاوت ممکن است به دلیل نوسانات طبیعی اقلیمی یا تأثیرات تغییرات اقلیمی منطقه باشد. تحلیل این تفاوت‌ها می‌تواند به درک بهتر روند بلندمدت پوشش برف و پایداری منابع آبی کمک کند. برای بررسی روند تغییرات روزانه پوشش برف در رشته‌کوه البرز در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴، از روش میانگین متحرک استفاده شد تا نوسانات کوتاه‌مدت کاهش یافته و روند کلی بهتر قابل مشاهده باشد. با این حال، مقدار ضریب تعیین (R^2) به مقدار بسیار پایین ۰/۰۰۷ رسید که نشان می‌دهد روند کلی روزانهٔ پوشش برف در این بازهٔ زمانی بسیار ضعیف و تقریباً فاقد الگوی قوی برای پیش‌بینی است. یعنی تنها ۰/۷ درصد از تغییرات پوشش برف روزانه توسط روند خطی (گذشت زمان) قابل توضیح است و ۹۹/۳ درصد از تغییرات تحت تأثیر عوامل دیگر است. بنابراین، نتایج حاکی از آن است که برای تحلیل روندهای پوشش برف در این منطقه، بهتر است به جای بررسی روزانه، از مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر مانند ماهانه یا سالانه استفاده شود تا روندهای بلندمدت قابل تشخیص‌تر و معنادارتر باشند. در مقیاس میانگین ماهانه بیش‌ترین مقدار مساحت پوشش برف به ترتیب مربوط ماه‌های ژانویه با مقدار ۲۴۴۱۶۱/۸۶۷ کیلومترمربع و فوریه با مقدار ۱۴۵۹۲۰/۵۹۷ کیلومتر مربع به دست آمد (شکل ب – ۲). تحلیل میانگین مساحت پوشش برف در مقیاس ماهانه نشان داد که بیش‌ترین مقدار پوشش برف در رشته‌کوه البرز مربوط به ماه‌های زمستانی است. این نتایج با الگوی فصلی طبیعی بارش برف و دمای پایین‌تر در این ماه‌ها همخوانی دارد و نشان‌دهندهٔ اوج پوشش برف در نیمهٔ اول زمستان است. در مقیاس سالانه (با یکتای زمانی) بیش‌ترین مقدار مساحت پوشش

1- Histogram
2- Scatterplot
3- Boxplot
4- Barplot

برف به ترتیب سال ۲۰۰۸ با مقدار ۳۴۳۴۳۵/۱۳۲ کیلومترمربع و سال ۲۰۰۵ با مقدار ۲۶۹۲۵۹/۵۵ کیلومتر مربع و کم‌ترین مقدار مساحت پوشش برف به ترتیب سال ۲۰۱۰ با مقدار ۱۳۸۷۵۹/۱۱ کیلومترمربع و سال ۲۰۱۸ با مقدار ۱۴۴۵۵۸/۲۷۶ کیلومتر مربع به دست آمد (شکل پ – ۲). مقدار ضریب تعیین (R^2) تغییرات مساحت پوشش برف سالانه با مقدار ۰/۱۲۴۸ به دست آمد. افزایش مقدار R^2 در مقیاس سالانه نسبت به مقیاس روزانه، بیانگر این است که روندهای بلندمدت پوشش برف قابل تشخیص‌تر و معنادارتر هستند و این مقیاس زمانی برای تحلیل روندهای اقلیمی کمی مناسب‌تر است. سال ۲۰۰۸ به‌عنوان سال اوج پوشش برف مشخص شده که احتمالاً متاثر از شرایط جوی و اقلیمی خاص همان دوره بوده است. سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۸ با کم‌ترین پوشش برف، ممکن است نشان‌دهنده دوره‌های خشکسالی یا تغییرات اقلیمی موقت در منطقه باشند که می‌تواند پیامدهای مهمی برای منابع آب و مدیریت محیطی در منطقهٔ تحقیقاتی رشته کوه البرز داشته باشد.



شکل ۲- نمودارهای مقادیر مساحت پوشش برف روزانه، ماهانه و سالانه در رشته کوه البرز در طی دوره ۲۰۲۴- ۲۰۰۱

Fig .2. Graphs of Daily, Monthly, and Annual Snow Cover Area Values in the Alborz Mountain Range during the 2001–2024 Period

یافته‌ها نشان داد که بیش‌ترین پوشش برف در تمامی مقیاس‌ها (روزانه، ماهانه و سالانه) در ماه‌های زمستان، به‌ویژه ژانویه و فوریه، رخ داده است. این موضوع با چرخهٔ طبیعی آب و هوای منطقه و اوج بارش‌های برفی در فصل زمستان مطابقت دارد.

تمرکز حداکثری پوشش برف در همین بازهٔ زمانی، اهمیت پایش و مدیریت منابع آب را در ماه‌های زمستانی دو چندان می‌کند. تکرار سال ۲۰۰۸ در تمام مقیاس‌ها (روزانه، ماهانه و سالانه) به‌عنوان سال اوج پوشش برف، نشان‌دهندهٔ شرایط اقلیمی ویژه در آن سال است. سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۸ به‌عنوان سال‌های دارای کم‌ترین پوشش برف ثبت شده‌اند که می‌تواند نشان‌دهندهٔ دوره‌های خشک، افزایش دمای زمستان یا کاهش بارش برف باشد. این سال‌ها باید به‌عنوان سال‌های بحرانی از نظر ذخایر برف و منابع آب در مطالعات مدیریت ریسک مورد توجه قرار گیرند.

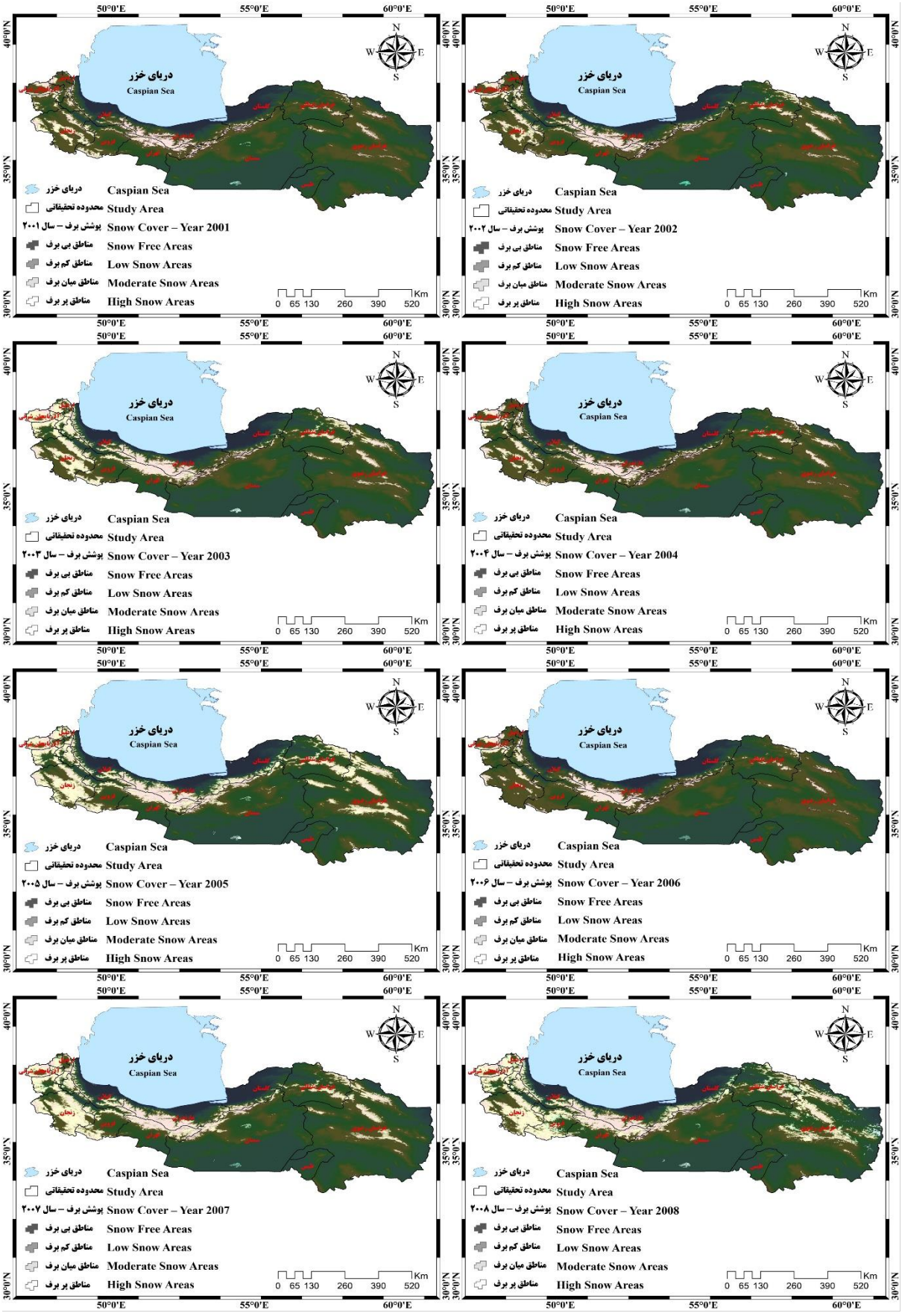
در پژوهش حاضر بعد از این که تغییرات مساحت پوشش برف در منطقهٔ مورد مطالعه محاسبه شدند، نقشه‌های بصری تغییرات پوشش برف با استفاده از داده‌های سنجش از دور در محیط ArcGIS ترسیم شدند. با توجه به نتایج پژوهش که سال ۲۰۰۸ با مقدار ۳۴۳۴۳۵/۱۳۲ کیلومتر مربع بیش‌ترین مساحت پوشش برفی سال را در دورهٔ ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ طی ماه‌های سرد سال (دسامبر تا آوریل) به خود اختصاص داد. نقشهٔ ارائه‌شده نشان‌دهندهٔ توزیع مکانی پوشش برف در سال ۲۰۰۸ در امتداد رشته‌کوه البرز است. در این سال، گسترهٔ برف در این ناحیه بسیار وسیع بوده و بخش‌های قابل‌ملاحظه‌ای از نواحی کوهستانی را در برگرفته است. مناطق پوشیده از برف با رنگ سفید مشخص شده‌اند و طبق راهنمای نقشه، می‌توان آن‌ها را به چهار دسته از نظر تراکم برف تقسیم کرد. نواحی غربی رشته‌کوه البرز شاهد تراکم بالای پوشش برف هستند. در این نواحی، الگوی مکانی برف بیش‌تر با ارتفاعات بالادست و عرض‌های جغرافیایی بالاتر همبستگی دارد. این منطقه به‌دلیل تأثیر پذیرفتن از جبهه‌های مرطوب مدیترانه‌ای، معمولاً بیش‌ترین میزان بارش برف را دارد. در نواحی مرکزی البرز، پوشش برف به‌صورت نوار ممتدی در ارتفاعات دیده می‌شود. تراکم برف در این منطقه نیز قابل توجه است، به‌ویژه در دامنه‌های شمالی البرز که بیش‌تر در معرض رطوبت دریای خزر قرار دارند. این الگو نشان می‌دهد که سال ۲۰۰۸ با وقوع بارش‌های سنگین و سرمای شدید، شرایط مناسبی برای انباشت برف در این مناطق فراهم کرده است. در بخش‌های شرقی البرز، علیرغم اینکه عموماً بارش برف نسبت به بخش‌های غربی کم‌تر است، اما در سال ۲۰۰۸ نیز شاهد گسترهٔ نسبتاً وسیعی از پوشش برف در این نواحی هستیم. این موضوع نشان‌دهنده‌ی توزیع نسبتاً یکنواخت سیستم‌های بارشی در این سال بوده است که توانسته به شرق البرز نیز نفوذ کند. در دامنه‌های جنوبی البرز، به‌ویژه مناطق پایین‌دست استان‌هایی مانند سمنان، قم و بخش‌هایی از تهران و مرکزی، پوشش برف به‌صورت پراکنده و با تراکم کم دیده می‌شود. این مناطق به‌دلیل ارتفاع کم‌تر و دمای بالاتر، اغلب پوشش برفی پایداری ندارند. در مجموع، الگوی مکانی نشان می‌دهد که در سال ۲۰۰۸ شرایط اقلیمی خاصی بر منطقه حاکم بوده که باعث گسترش بی‌سابقه پوشش برف در تمام پهنهٔ البرز شده است. ترکیب عرض جغرافیایی، ارتفاع، فاصله از دریا و جهات توپوگرافی در شکل‌گیری این الگو نقش مهمی داشته‌اند (شکل ۳). در نقشهٔ تغییرات مساحت پوشش برف که برای سال ۲۰۱۲ با استفاده از داده‌های سنجش از دور در نرم‌افزار ArcGIS ترسیم شده، اطلاعات ارزشمندی از الگوی مکانی برف برای منطقه مورد مطالعه ارائه شد. نقشهٔ سال ۲۰۱۲ توزیع فضایی پوشش برف را با دسته‌بندی مناطق بی‌برف تا پربرف در محدودهٔ رشته‌کوه البرز به‌خوبی نشان می‌دهد. اگرچه از نظر مساحت کلی برف، سال ۲۰۱۲ به اندازه سال ۲۰۰۸ گسترده نیست، اما در این سال بر اساس داده‌های تحلیلی، شدت بارش‌های برفی، عمق برف و محتوای آب معادل برف در نقاط مشخصی به اوج خود رسیده‌اند.

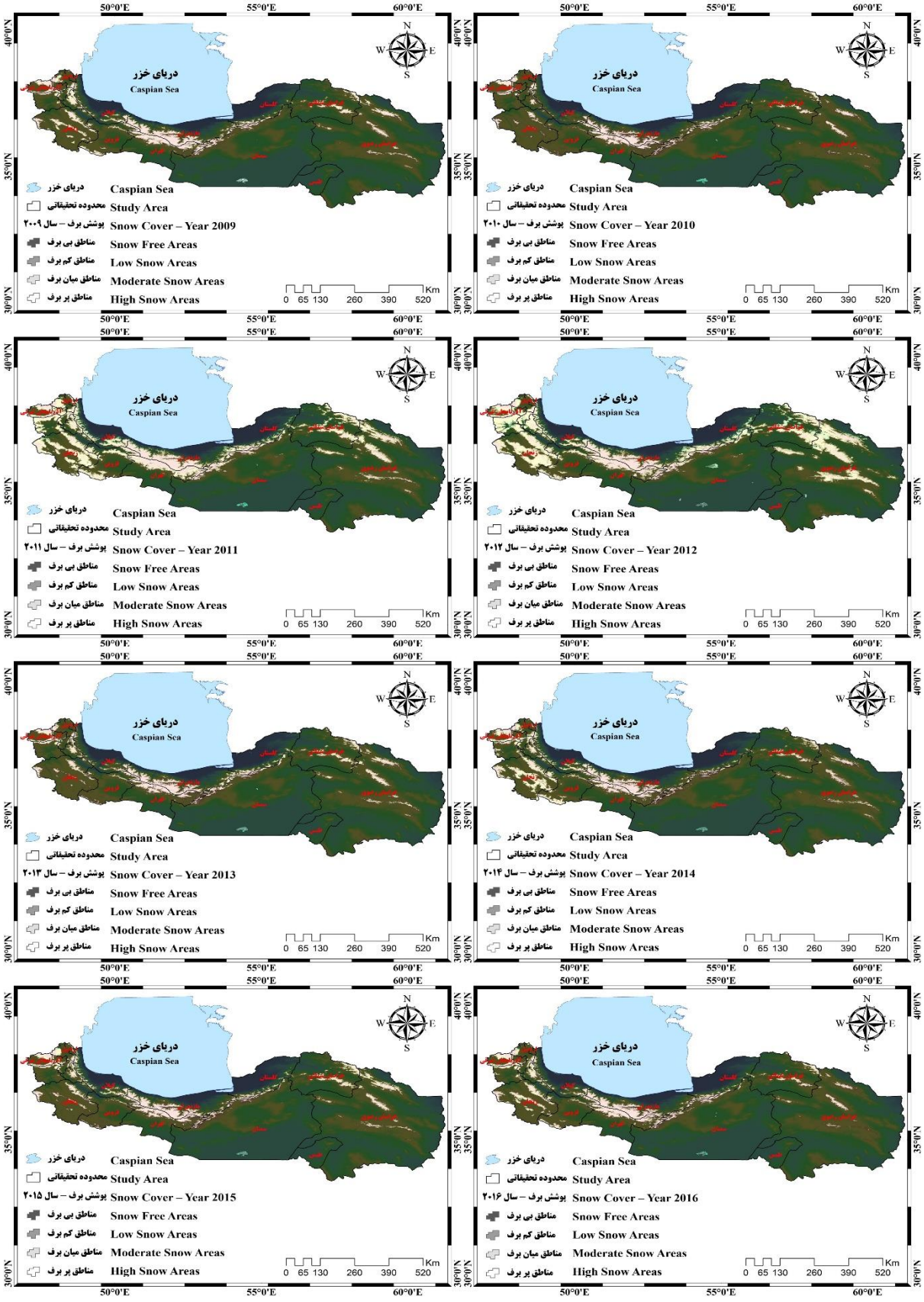
بخش‌های شرقی البرز نسبت به سال ۲۰۰۸، پوشش برف بیش‌تری را نشان می‌دهند. نواحی مرتفع در این استان‌ها دارای تراکم بالاتری از برف هستند که می‌تواند ناشی از نفوذ توده‌های هوای سرد همراه با رطوبت از شمال‌شرق باشد. این ناحیه بیش‌ترین عمق برف و آب معادل برف را در سال ۲۰۱۲ تجربه کرده است. نواحی مرکزی البرز، پوشش برف نسبتاً پیوسته‌ای دارند، اما تراکم و گستردگی آن نسبت به سال ۲۰۰۸ اندکی کاهش یافته است. با این حال، به‌واسطه ارتفاع بالا و موقعیت جغرافیایی، این مناطق هم‌چنان در زمرهٔ نواحی میان‌برف تا پربرف قرار می‌گیرند. در نواحی غربی البرز، کاهش قابل توجهی در گسترهٔ پوشش برف نسبت به سال ۲۰۰۸ دیده می‌شود؛ این ممکن است ناشی از تضعیف جبهه‌های غربی یا تمرکز بارش‌ها در بخش شرقی کشور در آن سال باشد. دامنه‌های جنوبی کل البرز، مشابه سال ۲۰۰۸ هم‌چنان دارای پوشش برف محدود هستند و در اغلب موارد در دسته‌های کم‌برف یا بی‌برف قرار دارند. این الگو عمدتاً به علت ارتفاع کم‌تر، تابش مستقیم خورشید و دمای بالاتر در این دامنه‌ها است. در مجموع، سال ۲۰۱۲ اگرچه از نظر مساحت پوشش برف گستردگی کم‌تری نسبت به سال ۲۰۰۸

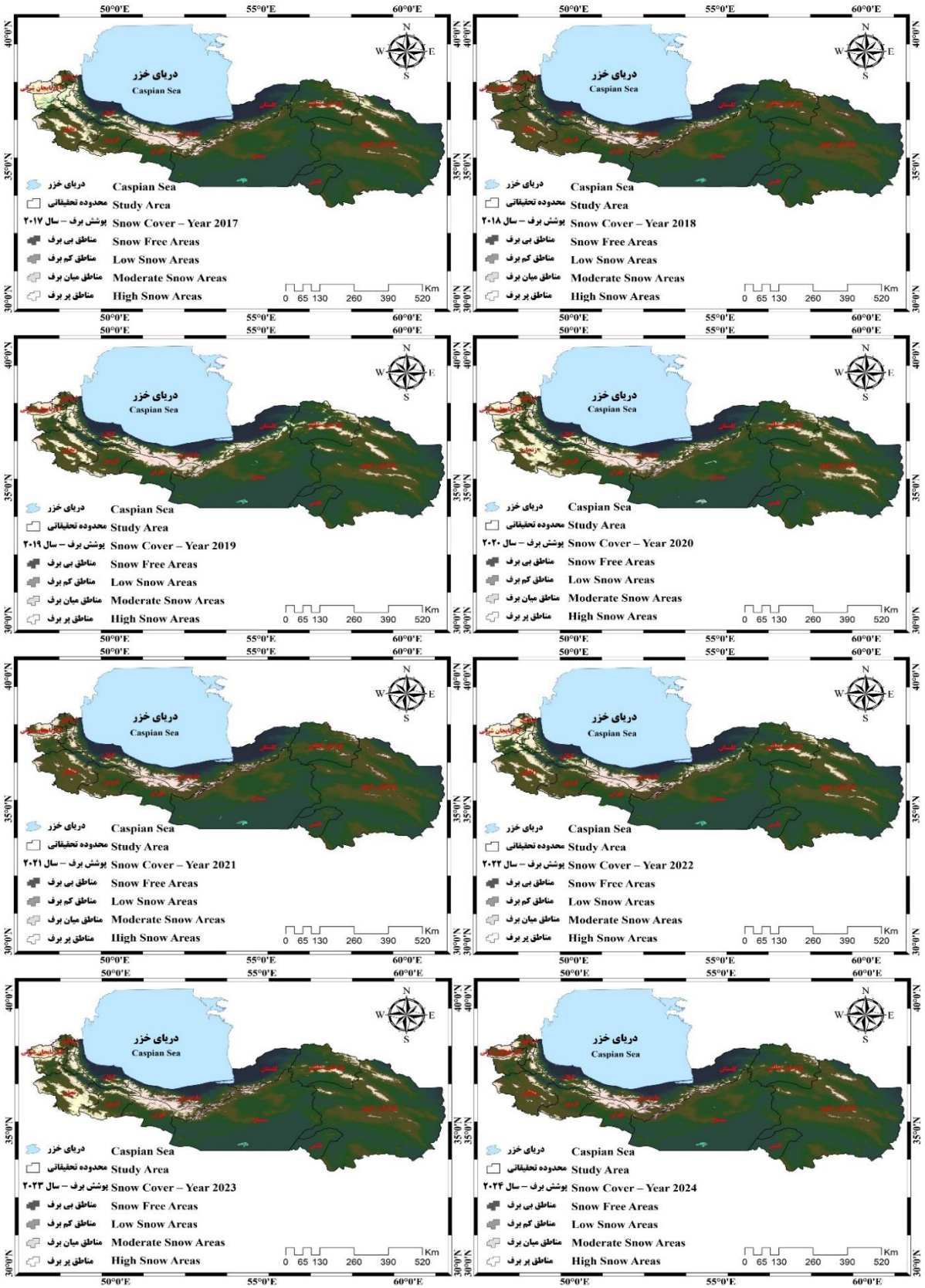
دارد، اما حضور برف در نواحی شرقی با تراکم بالا و پارامترهای کیفی قوی‌تر (عمق، آب معادل برف و نرخ بارش)، نشان‌دهندهٔ رخداد بارش‌های سنگین برف در نواحی خاص است. (شکل ۳). با وجود آن‌که مساحت پوشش برف در سال ۲۰۰۸ بیش‌ترین مقدار را نشان داد، پارامترهای عمق برف، آب معادل برف و نرخ شدت لحظه‌ای بارش در سال ۲۰۱۲ به طور قابل‌ملاحظه‌ای بالاتر بودند. این تفاوت می‌تواند ناشی از پراکنش مکانی و شدت بارش باشد؛ به طوری که در سال ۲۰۰۸ بارش برف گسترده ولی کم‌عمق‌تر و در مساحت وسیع‌تری رخ داده است، در حالی که در سال ۲۰۱۲ بارش‌های متمرکزتر و شدیدتری منجر به افزایش عمق و تجمع برف در مناطق محدودتری شده است. علاوه بر این، عوامل دمایی و سامانه‌های جوی مختلف نیز نقش مهمی در تغییر الگوهای بارش و پوشش برف ایفا کرده‌اند. این یافته‌ها بر اهمیت بررسی همزمان پارامترهای مختلف هیدرولوژیکی برای درک کامل روندهای بارش برف تأکید دارند.

یافته‌های بررسی سه پارامتر میانگین عمق برف ، میانگین آب معادل برف و میانگین نرخ بارش برف ، بیانگر این می‌باشد که میانگین عمق برف در بازهٔ زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نشان داد که بیش‌ترین مقادیر آن در روزهای خاص زمستانی ثبت شده‌اند. به طور مشخص به ترتیب در روزهای یک فوریه سال ۲۰۱۲ با مقدار ۲۱/۷۰ سانتی‌متر، یک ژانویه سال ۲۰۰۸ با مقدار ۱۸/۱۴ سانتی‌متر و یک فوریه ۲۰۰۵ با مقدار ۱۵/۲۸ سانتی‌متر حاصل شد (شکل الف – ۴). بالاترین مقادیر عمق برف در ماه‌های ژانویه و فوریه مشاهده شده‌اند، که مطابق با اوج فصل سرد و فعالیت سامانه‌های بارشی در منطقه البرز است. سال ۲۰۱۲ با ثبت بیشینه ۲۱/۷۰ سانتی‌متر، احتمالاً تحت تأثیر یک یا چند سامانه قوی بارشی زمستانه بوده است. مقادیر قابل ملاحظه میانگین عمق برف در بین سال‌ها نشان‌دهندهٔ نوسانات بین‌سالی در میزان ذخیره برف است، که می‌تواند ناشی از تغییر الگوهای گردش جو، دمای سطح زمین، و حتی تغییر اقلیم منطقه باشد. عمق برف یکی از شاخص‌های مهم برای برآورد ذخایر آبی آینده (ذوب برف‌ها در بهار) می‌باشد. کاهش روند عمق برف در سال‌های اخیر می‌تواند زنگ خطری برای منابع آب حوضه‌های پایین‌دست باشد. نمودار سری زمانی عمق برف در دوره‌ی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار عمق برف در سال ۲۰۱۲ به ثبت رسیده است. برای بررسی روند تغییرات در طول زمان، یک مدل رگرسیون خطی بین متغیر زمان (سال) و عمق برف برازش داده شد که ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۰۳۷ به دست آمد. مقدار مذکور به این معناست که تنها ۳/۷ درصد از تغییرات عمق برف توسط روند زمانی قابل تبیین است، در حالی که ۹۶/۳ درصد از تغییرات تحت تأثیر سایر عوامل (از جمله نوسانات طبیعی بالا مانند عمق برف به شدت تحت تأثیر تغییرات فصلی، شدت و الگوی بارش‌های سالانه و سایر شرایط جوی متغیر است. این نوسانات ذاتی می‌تواند باعث کاهش قدرت توضیح‌دهندگی مدل خطی شود) قرار دارد.

بررسی میانگین آب معادل برف در دورهٔ زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نشان داد که بیشینهٔ این پارامتر در ماه‌های زمستان و اوایل بهار رخ داده است: نتایج میانگین آب معادل نیز نشان دهنده این بود که بیش‌ترین مقدار آن به ترتیب ۴/۹۶ سانتی‌متر در یک فوریه سال ۲۰۱۲، مقدار ۳/۶۲ سانتی‌متر در یک فوریه ۲۰۰۵ و مقدار ۳/۴۵ سانتی‌متر در یک مارس سال ۲۰۰۷ به دست آمد (شکل ب – ۴). مقادیر بالای میانگین آب معادل برف در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۰۵ با همان سال‌هایی که بیش‌ترین عمق برف ثبت شد هم‌زمان است. این موضوع تأیید می‌کند که بیش‌ترین عمق برف معمولاً با افزایش مقدار آب ذخیره‌شده در قالب برف همراه است. مقدار ۴/۹۶ سانتی‌متر میانگین آب معادل برف در یکم فوریه ۲۰۱۲ بیان‌گر یک ذخیره آبی مهم در آن سال است. این مقدار برای یک منطقهٔ کوهستانی مانند رشته کوه البرز قابل توجه است و احتمالاً به دنبال بارش‌های سنگین و دمای پایین در آن بازه رخ داده است. ثبت سومین بیشینه در ماه مارس نشان می‌دهد که در سال ۲۰۰۷ بخشی از بارش‌های برفی در اواخر زمستان یا حتی اوایل بهار رخ داده‌اند. این می‌تواند به دلیل کشیدگی فصل سرما یا تأخیر در ذوب باشد. میانگین آب معادل برف مستقیماً به ذخایر آبی بالقوه مربوط است، زیرا نشان می‌دهد پس از ذوب برف، چه حجمی از آب در دسترس خواهد بود. مقادیر بالای آب معادل برف در برخی سال‌ها (مانند ۲۰۱۲) می‌تواند برای مدیریت منابع آب اهمیت داشته باشد. اگر مقادیر میانگین آب معادل برف در سال‌های پایانی (مثلاً ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴) روند کاهشی داشته باشد، ممکن است نشان‌دهندهٔ اثرات تغییر اقلیم، افزایش دمای زمستان، یا کاهش بارش‌های برف‌زا باشد که باید بررسی شود.


50°0'E
55°0'E
60°0'E
40°0'N
35°0'N
30°0'N
N
W
E
S
دریای خزر
Caspian Sea
دریای خزر Caspian Sea
محدوده تحقیقاتی Study Area
پوشش برف – سال ۲۰۰۱ Snow Cover – Year 2001
مناطق بی برف Snow Free Areas
مناطق کم برف Low Snow Areas
مناطق میان برف Moderate Snow Areas
مناطق پر برف High Snow Areas
0 65 130 260 390 520 Km
دریای خزر Caspian Sea
محدوده تحقیقاتی Study Area
پوشش برف – سال ۲۰۰۲ Snow Cover – Year 2002
مناطق بی برف Snow Free Areas
مناطق کم برف Low Snow Areas
مناطق میان برف Moderate Snow Areas
مناطق پر برف High Snow Areas
0 65 130 260 390 520 Km
دریای خزر Caspian Sea
محدوده تحقیقاتی Study Area
پوشش برف – سال ۲۰۰۳ Snow Cover – Year 2003
مناطق بی برف Snow Free Areas
مناطق کم برف Low Snow Areas
مناطق میان برف Moderate Snow Areas
مناطق پر برف High Snow Areas
0 65 130 260 390 520 Km
دریای خزر Caspian Sea
محدوده تحقیقاتی Study Area
پوشش برف – سال ۲۰۰۴ Snow Cover – Year 2004
مناطق بی برف Snow Free Areas
مناطق کم برف Low Snow Areas
مناطق میان برف Moderate Snow Areas
مناطق پر برف High Snow Areas
0 65 130 260 390 520 Km
دریای خزر Caspian Sea
محدوده تحقیقاتی Study Area
پوشش برف – سال ۲۰۰۵ Snow Cover – Year 2005
مناطق بی برف Snow Free Areas
مناطق کم برف Low Snow Areas
مناطق میان برف Moderate Snow Areas
مناطق پر برف High Snow Areas
0 65 130 260 390 520 Km
دریای خزر Caspian Sea
محدوده تحقیقاتی Study Area
پوشش برف – سال ۲۰۰۶ Snow Cover – Year 2006
مناطق بی برف Snow Free Areas
مناطق کم برف Low Snow Areas
مناطق میان برف Moderate Snow Areas
مناطق پر برف High Snow Areas
0 65 130 260 390 520 Km
دریای خزر Caspian Sea
محدوده تحقیقاتی Study Area
پوشش برف – سال ۲۰۰۷ Snow Cover – Year 2007
مناطق بی برف Snow Free Areas
مناطق کم برف Low Snow Areas
مناطق میان برف Moderate Snow Areas
مناطق پر برف High Snow Areas
0 65 130 260 390 520 Km
دریای خزر Caspian Sea
محدوده تحقیقاتی Study Area
پوشش برف – سال ۲۰۰۸ Snow Cover – Year 2008
مناطق بی برف Snow Free Areas
مناطق کم برف Low Snow Areas
مناطق میان برف Moderate Snow Areas
مناطق پر برف High Snow Areas
0 65 130 260 390 520 Km


50°0'E
55°0'E
60°0'E
40°0'N
35°0'N
30°0'N
N
W
E
S
دریای خزر
Caspian Sea
دریای خزر Caspian Sea
محدوده تحقیقاتی Study Area
پوشش برف – سال ۲۰۰۹ Snow Cover – Year 2009
مناطق بی برف Snow Free Areas
مناطق کم برف Low Snow Areas
مناطق میان برف Moderate Snow Areas
مناطق پر برف High Snow Areas
0 65 130 260 390 520 Km
پوشش برف – سال ۲۰۱۰ Snow Cover – Year 2010
پوشش برف – سال ۲۰۱۱ Snow Cover – Year 2011
پوشش برف – سال ۲۰۱۲ Snow Cover – Year 2012
پوشش برف – سال ۲۰۱۳ Snow Cover – Year 2013
پوشش برف – سال ۲۰۱۴ Snow Cover – Year 2014
پوشش برف – سال ۲۰۱۵ Snow Cover – Year 2015
پوشش برف – سال ۲۰۱۶ Snow Cover – Year 2016



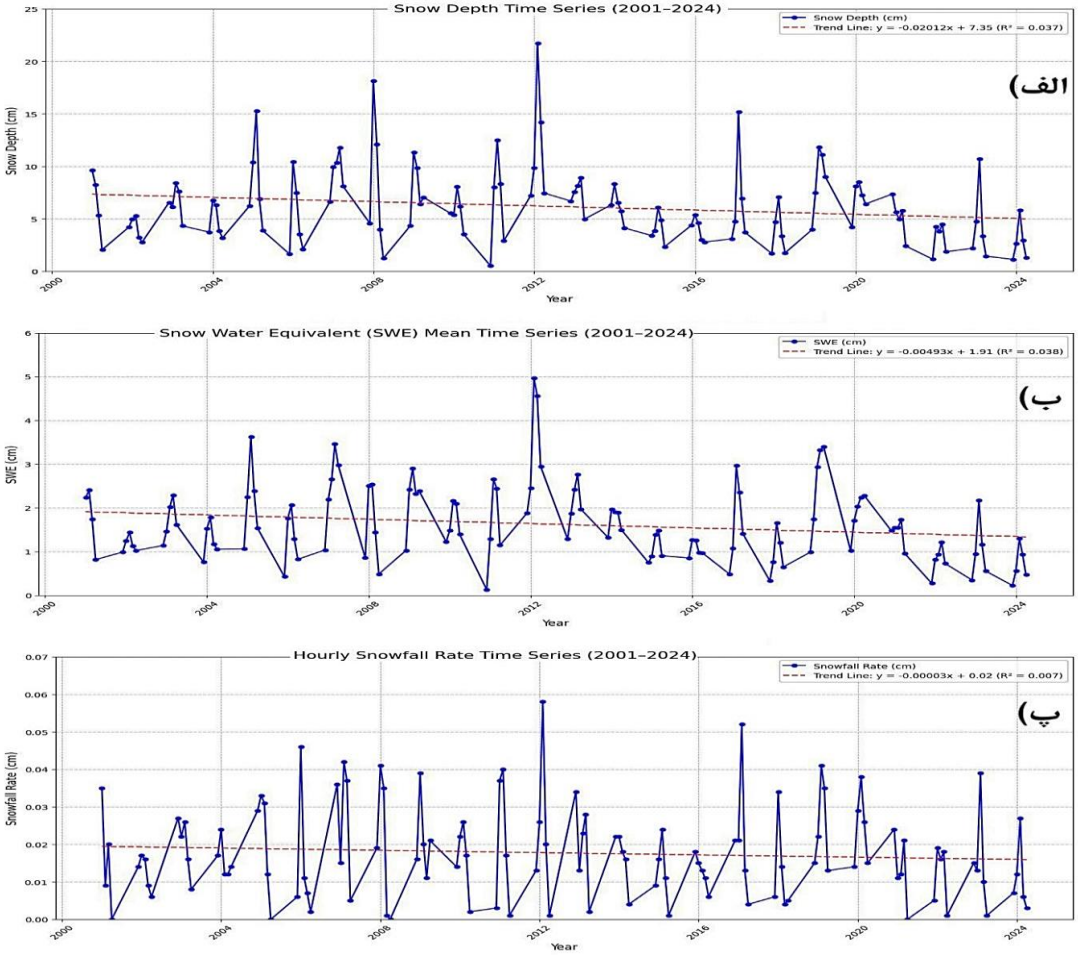
شکل ۳- تغییرات مساحت پوشش برف رشتهٔ کوه البرز در طی سال‌های ۲۰۲۴ – ۲۰۱۷

Fig. 3. Changes in Snow Cover Area of the Alborz Mountain Range during 2017–2024

نمودار سری زمانی آب معادل برف در بازۀ زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که بیشترین مقدار آب معادل برف در سال ۲۰۱۲ رخ داده است. به منظور بررسی روند تغییرات در طول زمان، یک مدل رگرسیون خطی بین متغیر زمان (سال) و مقدار آب معادل برف برازش داده شد که ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۰۳۸ به دست آمد. این مقدار بدین معناست که تنها ۳/۸ درصد از تغییرات آب معادل برف قابل تبیین توسط روند خطی زمان است؛ به بیان دیگر، ۹۶/۲ درصد از نوسانات آب معادل برف تحت تأثیر سایر عوامل غیر زمانی قرار دارند. براساس نتایج به دست آمده از میانگین شدت لحظه‌ای بارش، به ترتیب بیش‌ترین مقدار آن ۰/۰۵۸ میلی‌متر در ساعت در یک فوریه سال ۲۰۱۲، ۰/۰۵۲ میلی‌متر در ساعت در یک فوریه ۲۰۱۷ و ۰/۰۴۶ میلی‌متر در ساعت در یک ژانویه سال ۲۰۰۶ به دست آمد (شکل پ – ۴). براساس نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل میانگین نرخ شدت لحظه‌ای بارش برف در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴، سال ۲۰۱۲ در هر سه پارامتر (عمق برف، آب معادل برف، و نرخ بارش) بیشینه یا نزدیک به بیشینه را دارد. این همگرایی نشان می‌دهد که این سال احتمالاً دارای رخدادهای قوی و سنگین بارش برف با دمای مناسب برای بارش جامد بوده است. تکرار بیشینه‌ها در ماه فوریه (در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۷) نشان می‌دهد که اوج شدت بارش برف معمولاً در نیمۀ دوم زمستان (حدود بهمن) اتفاق افتاده است، زمانی که شرایط دینامیکی جو برای بارش سنگین مناسب‌تر است. نرخ بارش برف، به‌ویژه زمانی که همراه با دمای پایین و رطوبت کافی باشد، می‌تواند سبب انباشت سریع برف روی زمین شود. با توجه به این که در سال‌های پایانی دورۀ مطالعه، چنین نرخ‌هایی مشاهده نشده است، می‌تواند نشان‌دهندۀ گرم‌تر شدن زمستان‌ها و کاهش فراوانی بارش‌های برف شدید باشد. نمودار سری زمانی مربوط به نرخ بارش لحظه‌ای برف در بازۀ زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار این متغیر در سال ۲۰۱۲ ثبت شده است. برای بررسی وجود روند زمانی، یک مدل رگرسیون خطی بین سال (زمان) و نرخ بارش ترسیم شد که مقدار (R^2) برابر با ۰/۰۰۷ حاصل شد. این مقدار بسیار پایین بیانگر آن است که تنها ۰/۷ درصد از تغییرات نرخ بارش برف با گذر زمان (روند خطی) قابل توجیه است و در مقابل، ۹۹/۳ درصد از نوسانات نرخ بارش تحت تأثیر عوامل دیگری هستند که بیانگر این می‌باشد که مدل خطی توضیح‌دهی اندکی دارد؛ بنابراین تحلیل‌های غیرخطی یا مدل‌های پیچیده‌تر ممکن است مناسب‌تر باشند.

بررسی سه پارامتر کلیدی مرتبط با پوشش برف شامل میانگین عمق برف، میانگین آب معادل برف و میانگین نرخ شدت لحظه‌ای بارش برف در دورۀ زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴، تصویر جامعی از وضعیت بارش و ذخیره برفی در منطقۀ رشته‌کوه البرز ارائه می‌دهد. تحلیل دقیق این شاخص‌ها نشان‌دهندۀ ارتباط تنگاتنگ بین متغیرهای هیدرولوژیکی و اقلیمی منطقه می‌باشد. داده‌های هر سه پارامتر حاکی از وقوع سال ۲۰۱۲ به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین سال‌های دورۀ مورد مطالعه است. در این سال، بیشینۀ میانگین عمق برف (۲۱/۷۰ سانتی‌متر)، بیشینۀ میانگین آب معادل برف (۴/۹۶ سانتی‌متر) و بالاترین نرخ شدت لحظه‌ای بارش (۰/۰۵۸ میلی‌متر بر ساعت) به ثبت رسیده است. این هماهنگی آماری قوی نشان‌دهندۀ شرایط جوی مساعد برای بارش‌های سنگین و تجمع قابل‌توجه برف در منطقه است که می‌تواند ناشی از ترکیب عوامل سینوپتیکی مانند نفوذ سامانه‌های بارشی فعال، دمای پایین هوا و رطوبت مناسب باشد. تمامی پارامترها نشان می‌دهند که ماه‌های ژانویه و فوریه بیش‌ترین میزان بارش و پوشش برف را دارند. این بازۀ زمانی، دورۀ اوج سرمای زمستان و فعالیت سامانه‌های جوی سرد و مرطوب است که موجب بارش برف گسترده در رشته‌کوه البرز می‌شود.

نتایج آمار توصیفی سه متغیر عمق برف، آب معادل برف و نرخ بارش لحظه‌ای برف نشان داد که کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار نرخ بارش لحظه‌ای در بازه صفر تا ۰/۰۵۸ میلی‌متر در ساعت قرار دارد. هم‌چنین، حداقل و حداکثر مقدار عمق برف به ترتیب برابر با ۰/۵۱۲ سانتی‌متر و ۲۱/۷۰۸ سانتی‌متر و برای آب معادل برف نیز در بازه ۰/۱۲۹ تا ۴/۹۶۹ سانتی‌متر مشاهده شد. میانگین و انحراف معیار سه متغیر مذکور به ترتیب برای عمق برف، میانگین ۶/۱۶۳ سانتی‌متر با انحراف معیار ۳/۶۱۱ سانتی‌متر؛ آب معادل برف، میانگین ۱/۶۲۲ سانتی‌متر با انحراف معیار ۰/۸۶۷ سانتی‌متر و نرخ بارش لحظه‌ای؛ میانگین ۰/۰۱۷ میلی‌متر بر ساعت با انحراف معیار ۰/۰۱۲ میلی‌متر بر ساعت حاصل شد. هم‌چنین، ۷۵ درصد مقادیر عمق برف کم‌تر یا مساوی ۸/۰۳۹ سانتی‌متر است. مقادیر مشابه برای آب معادل برف و نرخ بارش نیز با توجه به جدول آمار توصیفی قابل استخراج و تفسیر می‌باشند (جدول – ۲).



شکل ۴- نمودارهای سری زمانی مقادیر عمق برف، آب معادل برف و نرخ لحظه‌ای بارش برف در رشته کوه البرز در طی دوره ۲۰۲۴-۲۰۰۱

Fig. 4. Time Series Graphs of Snow Depth, Snow Water Equivalent, and Instantaneous Snowfall Rate in the Alborz Mountain Range during the 2001–2024 Period

آمار توصیفی نشان داد که عمق برف در بازهٔ بسیار گسترده‌ای (از حدود نیم سانتی‌متر تا بیش از ۲۱ سانتی‌متر) در طول دورهٔ مطالعه تغییر کرده است. میانگین عمق برف حدود ۶ سانتی‌متر است که بیانگر بارش‌های برفی متوسط تا کم‌عمق در بیش‌تر روزهاست، ولی وجود مقادیر حداکثر بالا نشان‌دهندهٔ دوره‌های بارش شدید برف در برخی روزهاست. آب معادل برف نیز دامنه‌ای مشابه ولی با مقادیر کم‌تر دارد، که نمایانگر تراکم برف و میزان آب ذخیره شده در برف است. انحراف معیار نسبتاً بالا در هر دو متغیر نشان از تغییرات قابل توجه در شرایط بارش و تجمع برف در بازهٔ زمانی مطالعه دارد. نرخ بارش لحظه‌ای دارای میانگین بسیار پایین (حدود ۰/۰۱۷ میلی‌متر بر ساعت) است، که نشان‌دهندهٔ این است که بارش برف در اغلب مواقع با شدت کم تا متوسط رخ داده است. با این حال، مقدار حداکثر ۰/۰۵۸ میلی‌متر بر ساعت، بیانگر وجود دوره‌های کوتاه مدت بارش شدیدتر است. در نهایت، درصدهای مختلف (مانند ۷۵ درصد مقادیر کم‌تر یا مساوی) کمک می‌کند تا توزیع داده‌ها بهتر درک شود و نشان‌دهندهٔ این است که بیشتر مقادیر بارش و تجمع برف در محدوده پایین تا متوسط قرار دارند، اما نوسانات شدید و مقادیر بالا نیز در برخی دوره‌ها رخ داده‌اند. هم‌چنین به رفتار آماری سه متغیر کلیدی مرتبط با برف شامل عمق برف، آب معادل برف و نرخ لحظه‌ای بارش برف ادامه به‌صورت مجزا برای هر متغیر اقدام شد که در آنها توزیع عمق برف چوله به راست است و بیش‌ترین فراوانی بین ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر قرار دارد. داده‌ها در پراکندگی خود ناهمگون‌اند و اغلب زیر ۱۰ سانتی‌متر متمرکز شده‌اند. میانهٔ حدود ۵ سانتی‌متر است و مقادیر بالای ۱۵ سانتی‌متر به‌عنوان پرت شناخته می‌شوند. بیش‌ترین میانگین ماهانه در فوریه دیده شده و از آن پس تا آوریل روند تقریباً کاهش دارد (شکل الف – ۵). آب معادل برف نیز دارای توزیع چوله به

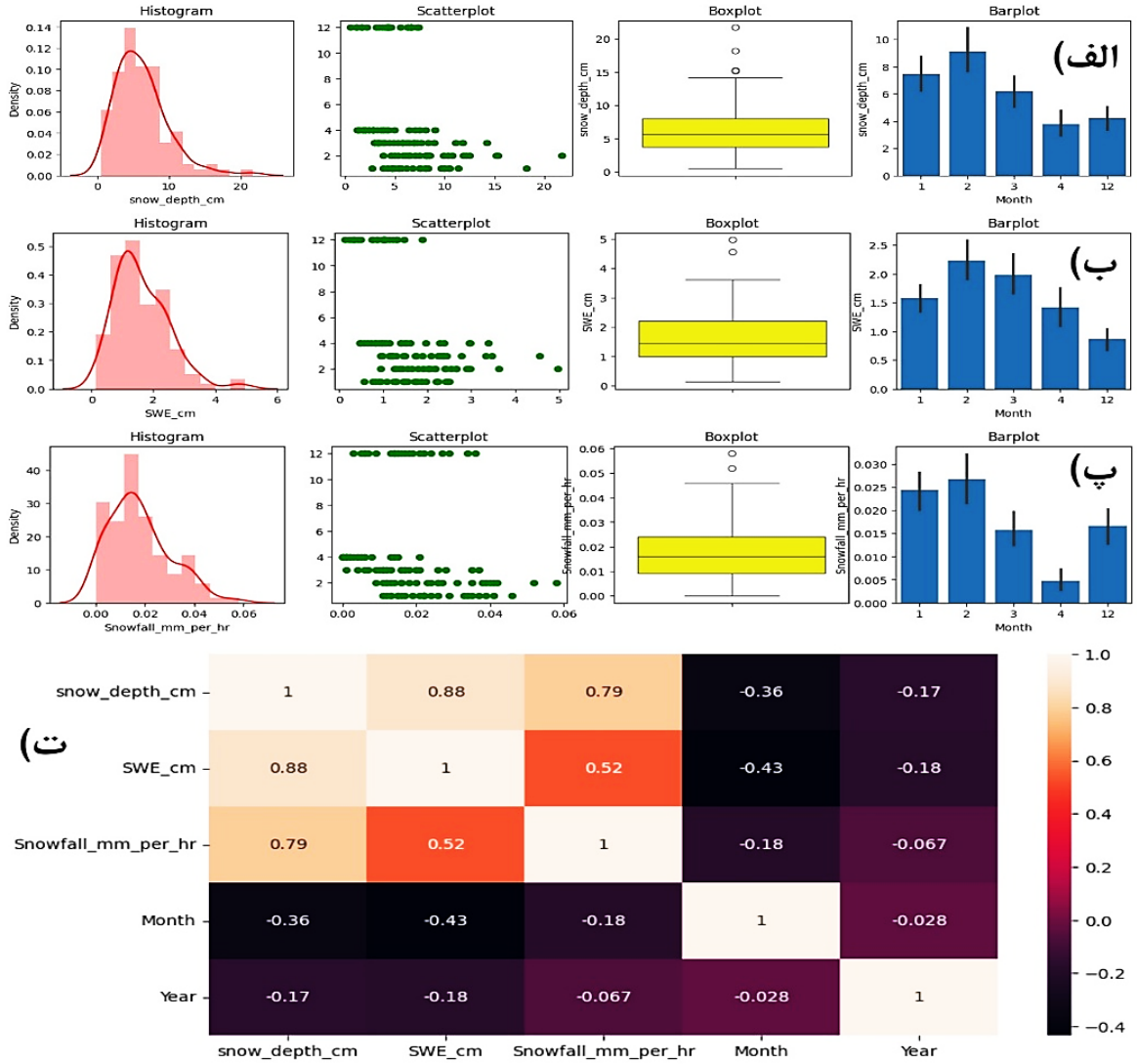
راست است و بیشتر داده‌ها در بازه ۱ تا ۲/۵ سانتی‌متر قرار دارند. تراکم بالا در مقادیر کم‌تر از ۲ سانتی‌متر دیده می‌شود و میانه تقریباً بین حدود ۱/۵ تا ۲ سانتی‌متر سانتی‌متر است. مقادیر بالای ۴ سانتی‌متر نادر و پرت هستند. دامنهٔ بین چارکی کوچک‌تر از عمق برف است که پایداری بیشتری را نشان می‌دهد. بیش‌ترین مقدار ماهانه در فوریه ثبت شده و احتمالاً به حفظ برف فشرده در سطح اشاره دارد (شکل ب – ۵).

جدول ۲– آمار توصیفی متغیرهای عمق برف، آب معادل برف و نرخ لحظه‌ای بارش برف در رشته کوه البرز در طی دوره ۲۰۲۴- ۲۰۰۱

Table 2 – Descriptive Statistics of Snow Depth, Snow Water Equivalent, and Instantaneous Snowfall Rate Variables in the Alborz Mountain Range during the 2001–2024 Period

نرخ بارش لحظه‌ای برف (mm/hr) Instantaneous Snowfall Rate (mm/hr)	آب معادل برف (cm) Snow Water Equivalent (cm)	عمق برف (cm) Snow Depth (cm)	
119	119	119	فراوانی یا تعداد Frequency or Count
0.017	1.622	6.163	میانگین Mean
0.012	0.876	3.611	انحراف معیار Standard Deviation (SD)
0.000	0.129	0.512	حداقل Minimum
0.009	0.987	3.718	Percent 25
0.016	0.459	5.639	Percent 50
0.024	2.212	8.039	Percent 75
0.058	4.969	21.708	حداکثر Maximum

در نرخ لحظه‌ای بارش برف توزیع این پارامتر به‌شدت چوله به راست است و بیش‌تر داده‌ها در بازه ۰/۰۱ تا ۰/۰۳ میلی‌متر بر ساعت قرار دارند. تمرکز داده‌ها در مقادیر پایین است و فقط چند نرخ بالا (بیش از ۰/۰۴ mm/hr) به‌عنوان رویداد شدید ثبت شده‌اند. میانه حدود ۰/۰۲ mm/hr است. بیشترین میانگین ماهانه در فوریه دیده شده و با گرم‌تر شدن هوا تا مارس کاهش محسوسی دارد (شکل پ – ۵). هم‌زمانی بیشینه میانگین ماهانه در عمق برف، آب معادل برف و نرخ بارش لحظه‌ای در ماه فوریه نشان می‌دهد که این ماه، نقطهٔ اوج فعالیت‌های برفی در منطقهٔ مورد مطالعه می‌باشد. چنین رفتاری بیانگر نقش کلیدی فوریه در انباشت و پایداری ذخایر برفی و به‌تبع آن، تأمین منابع آبی ذوب‌شونده در فصل بهار است. بر اساس نتایج و تحلیل هیت‌مپ، متغیر عمق برف با نرخ بارش و آب معادل برف رابطه خطی مثبت و نسبتاً قوی دارد؛ به طوری که ضریب همبستگی آنها به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۸۸ محاسبه شده است. این بدان معناست که با افزایش نرخ بارش، عمق برف و میزان آب معادل برف نیز افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، عمق برف با ماه‌های سال رابطه خطی معکوس (منفی) دارد (با ضریب همبستگی ۰/۳۶-)، به این معنا که با گذر ماه‌های سال، عمق برف کاهش می‌یابد. مشابه این روند برای متغیر آب معادل برف نیز مشاهده شده است، که با ماه‌های سال همبستگی منفی ۰/۴۳- دارد و نشان می‌دهد میزان آب معادل برف در طول سال کاهش می‌یابد. علاوه بر این، متغیرهای آب معادل برف و نرخ بارش نیز با ماه‌های سال رابطه خطی معکوس (منفی) دارند که ضریب همبستگی آن‌ها به ترتیب برابر با ۰/۴۳- و ۰/۱۸- گزارش شده است (شکل ت – ۵). نتایج همبستگی نشان می‌دهد که عمق برف و آب معادل برف به شدت تحت تأثیر نرخ بارش قرار دارند؛ افزایش شدت بارش به افزایش تجمع برف و مقدار آب معادل آن منجر می‌شود. این همبستگی مثبت، تأییدی بر پیوند مستقیم بین شدت بارش و حجم تجمع برف است. رابطهٔ منفی عمق برف و آب معادل با ماه‌های سال نمایان‌گر تغییرات فصلی است. با پیشرفت فصل سرما به سمت بهار، دما افزایش یافته و باعث ذوب تدریجی برف‌ها می‌شود که کاهش عمق و آب معادل برف را در پی دارد. هم‌چنین کاهش نرخ بارش در ماه‌های گرم‌تر موجب کاهش تجمع برف و آب معادل آن می‌گردد. این روابط همبستگی به درک بهتر روندهای زمانی و مکانی پوشش برف و بارش در منطقه کمک می‌کند و می‌تواند در مدل‌سازی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی کاربردی باشد.



شکل ۵- نمودارهای آماری متغیرهای عمق برف، آب معادل برف و نرخ لحظه‌ای بارش برف در رشته کوه البرز در طی دوره ۲۰۲۴-۲۰۰۱

Fig. 5. Statistical Graphs of Snow Depth, Snow Water Equivalent, and Instantaneous Snowfall Rate Variables in the Alborz Mountain Range during the 2001–2024 Period

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به مطالعه و برآورد مساحت پوشش برف در رشته کوه البرز در طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ با استفاده از داده‌های سنجش از دور در مقیاس‌های روزانه، ماهانه و سالانه اقدام شد. براساس نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر، ارزیابی مساحت پوشش برف بیان‌گر این بود که سیر تغییرات برف از الگوی یکسان و ثباتی تبعیت نمی‌کند و در طول زمان دچار نوسانات چشم‌گیری شده است. در مقیاس سالانه، بیشترین مقدار مساحت پوشش برف در سال ۲۰۰۸ و سال ۲۰۱۰ با کم‌ترین میزان مساحت پوشش برف در منطقهٔ تحقیقاتی به‌عنوان سال‌های شاخص شناسایی شدند. هم‌چنین در مقیاس‌های روزانه و ماهانه، بیشترین مساحت پوشش برف به طور غالب در ماه‌های ژانویه و فوریه به وقوع پیوسته است که نشان دهندهٔ تمرکز بارش‌های برفی در فصل زمستان در سال‌های مورد مطالعه می‌باشد. علاوه‌بر این، واکاوی سه پارامتر کلیدی مرتبط با برف شامل عمق برف، آب معادل برف و نرخ لحظه‌ای بارش برف آشکار ساخت که بیشترین مقادیر این متغیرها در سال ۲۰۱۲ مشخص شدند. این موضوع بیانگر این می‌باشد که شدت و مشخصه‌های فیزیکی بارش‌های برفی در سال مذکور کاملاً برجسته و محسوس

بوده‌اند، اگرچه مساحت پوشش برف در همان سال نسبت به سال ۲۰۰۸ پایین می‌باشد. این عدم تطابق، اهمیت بررسی چند جانبهٔ متغیرهای کیفی و کمی برف را آشکار می‌سازد.

تجزیه و تحلیل‌های آماری و نمودارهای توصیفی بیان‌گر آن می‌باشد که توزیع داده‌ها چوله به راست می‌باشد. همبستگی مثبت بین عمق برف با متغیرهای آب معادل برف و نرخ بارش، و هم‌چنین همبستگی منفی این متغیرها با پیش‌روی ماه‌های سال، مشخص‌کنندهٔ کاهش تدریجی خصوصیات برفی در فصول گرم‌تر است. هم‌چنین یافته‌ها نشان‌دهنده آن است که نوسانات پوشش برف و خصوصیات وابسته به آن به شدت تحت تأثیر عوامل پیچیده، غیر بازگشتی و غیرخطی نظیر نوسانات اقلیمی، تغییرات جوی، بارش‌های نامنظم و حتی تأثیرات و فعالیت‌های انسانی هستند. تحقیق حاضر ضمن نمایان ساختن روندهای تحلیل فضایی و زمانی پوشش برف، بر ضرورت استفاده از مدل‌های پیشرفته و غیرخطی در ارزیابی‌های آینده و پیش‌بینی رفتار برف در مناطق کوهستانی تاکید دارد؛ چرا که تنها با نگاهی چند بعدی می‌توان به درکی دقیق‌تر از تغییرات زمانی برف در شرایط تغییر اقلیم به دست آورد. بررسی الگوهای فضایی مشخص کرد که تمرکز پوشش برف در نواحی مرتفع شمالی، مرکزی و غربی البرز بیشتر است و عواملی چون ارتفاع، عرض جغرافیایی، و جهت دامنه‌ها تأثیر اساسی در الگوی مکانی برف دارند. این نتایج می‌توانند در برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آب و پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر مناطق کوهستانی ایران اثر بسزایی داشته باشد. هم‌چنین یافته‌ها نشان داد که ترکیب شاخص‌های وسعت اوج و شاخص‌های تجمعی برف، دید بهتری نسبت به الگوی جریان آب در منطقه فراهم می‌کند. با توجه به مطالعه‌های انجام شده در تحقیقات گذشته در زمینه پوشش برف براساس روش‌های مختلف، در پژوهش حاضر به پایش و تحلیل تغییرات پوشش برف و متغیرهای مرتبط با آن در منطقهٔ مورد مطالعه انجام شد. یافته‌های حاصل شده تحقیق حاضر با نتایج سایر پژوهشگران مانند: عزیزی و همکاران (Azizi, Rahimi, Mohammadi & Khoshakhlagh, 2017)؛ نوروز ولاشدی و بهرامی پیچاقچی (Norooz Valashedi & Bahrami Pichaghchi, 2023)؛ یاراحمدی و همکاران (Yarahmadi et al., 2020)؛ یوسفی‌زاده و همکاران (Yousefizadeh, Sehatkashani, Gholamnia, Maleki & Einali, 2022) و جمس و همکاران (Jems, Yarahmadi, Nasiri & Mirhashemi, 2023) مورد ارزیابی، تحلیل و مقایسه قرار گرفت. نتایج پژوهش حاضر با مطالعات پیشین، به ویژه در زمینهٔ روند کلی تغییرات پوشش برف و تمرکز برف در فصول سرد، همسو است، که نشان‌دهنده تأیید تجربی روندهای اقلیمی مشاهده شده در منطقه است. با این حال، تفاوت‌های مهمی نیز مشاهده می‌شود: برخلاف تحقیقات گذشته که معمولاً تنها بر برآورد مساحت پوشش برف یا به یکی مؤلفه‌های مرتبط برف تمرکز داشته‌اند و غالباً بخش محدودی از رشته‌کوه البرز را پوشش داده‌اند، در حالی که نتایج به دست آمده در این پژوهش نسبت به مطالعات پیشین دارای مزایای چشمگیری داشت، از جمله پوشش کامل پهنهٔ رشته‌کوه البرز در مطالعه حاضر به جای تمرکز محدود بر بخش‌هایی از آن، امکان تحلیل جامع‌تری را فراهم کرده است. برخلاف تحقیقات قبلی که فقط به برآورد پوشش برف اقدام کرده‌اند، در این مطالعه متغیرهای مرتبط با پوشش برف مانند عمق برف، آب معادل برف و نرخ لحظه‌ای بارش نیز مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. برتری دیگر پژوهش حاضر استفاده همزمان از داده‌های ماهواره‌ای MODIS و مدل‌سازی FLDAS در بستر سامانه تحت وب GEE است که امکان تحلیل دقیق‌تر و جامع‌تری از پوشش برف و مؤلفه‌های مرتبط با آن را فراهم می‌کند. این جامعیت در تحلیل مؤلفه‌ها سبب شده است که نتایج، دقیق‌تر و کاربردی‌تری از پیامد تغییرات اقلیمی بر منابع آبی در منطقه ارائه شود.

References

Aalinejad, M. H., Jahanbakhsh, S., & Mohammad Khorshiddoust, A. (2021). Simulation of runoff from Qarahsoo basin snowmelt By Using SRM model. *Journal of Geography and Planning, 25*(76), 87-97. [In Persian] https://doi.org/10.22034/gp.2021.13139

Abbasi Jandani, S., & Fathzadeh, A. (2015). Assessing of interpolation methods in order to snow water equivalent estimation. *Journal of Range and Watershed Managment, 68*(4), 779-793. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jrwm.2015.56959

Abdam, S., Fathzadeh, A., Taghizadeh Mehrjardi, R., & Mahjoubi, J. (2016). Digital Mapping of Snow Water Equivalent using an Artificial Neural Network and Geomorphometric Parameters (Case study: Sakhvid watershed, Yazd). *Journal of Watershed Manage Research*, *7*(13), 149-138. [In Persian] http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jwmr.7.13.149

Ahmadi, M., & Seyedmirzaei, Z. (2022). Snow Cover Variability in the Cold Period of the Year in Iran Based on MODIS Measurements. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, *14*(1), 59-72. [In Persian] https://doi.org/10.52547/gisj.14.1.59

Atif, I., Mahboob, M., & Iqbal, J. (2015). Snow cover area Change assessment in 2003 and 2013 using MODIS data of the Upper Indus Basin, Pakistan. *Journal of Himalayan Earth Sciences*, *48*, 117-128. http://ojs.uop.edu.pk/jhes/article/view/1952

Azizi, G., Rahimi, M., Mohammadi, H., & Khoshakhlagh, F. (2017). Spatio-temporal variations of snow cover in the southern slope of central Alborz. *Physical Geography Research*, *49*(3), 381-393. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2017.217393.1006943

Banerjee, S., Sati, V. P., Almazroui, M., & Chakraborty, S. (2024). Spatio-Temporal assessment of areal fragmentation and volume of snow cover in the central himalaya. *Earth Systems and Environment*, *8*(4), 1639-1656. https://doi.org/10.1007/s41748-024-00469-y

Berezowski, T., Chormanski, J., & Batelaan, O. (2015). Skill of remote sensing snow products for distributed runoff prediction. *Journal of Hydrology*, *524*, 718- 732 https://doi.org/10.1016/ j.jhydrol.2015 .03.025

Dariane, K., Santi, A., & Amin, E. (2017). Investigating Spatiotemporal snow cover variability via cloud free MODIS snow cover product in central AIborz region. *Remote Sensing of Environment, 202*, 152-165. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.042

Di Marco, N., Avesani, D., Righetti, M., Zaramella, M., Majone, B., & Borga, M. (2021). Reducing hydrological modelling uncertainty by using MODIS snow cover data and a topography-based distribution function snowmelt model. *Journal of Hydrology*, *599*, 126020. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126020

Dixit, A., Goswami, A., Jain, S., & Das, P. (2024). Assessing snow cover patterns in the Indus-Ganga-Brahmaputra River Basins of the Hindu Kush Himalayas using snow persistence and snow line as metrics. *Environmental Challenges, 14*, 100834. https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100834

Ebadi, Y., Eftekhary, A., Mohammad Khanlu, H., & Fakhri, M. (2021). Providing a new spectral index to extract snow cover using optical remote sensing images. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, *30*(117), 79-94. [In Persian] https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.244452

Ebrahimi, R., Hamzeh, S., & Marofi, S. (2016). Modeling the snow cover and snowmelt runoff using a combination of SRM hydrological model and satellite imagery. *Irrigation and Water Engineering*, *6*(3), 66-77. [In Persian] https://www.waterjournal.ir/article_73957.html?lang=en

Faraji, A., Kamangar, M., & Ashrafi, S. (2024). Spatial Analysis of Snow Cover in Western Iran Using Satellite Imagery. *Water and Soil*, *38*(1), 161-173. [In Persian] https://doi.org/10.22067/jsw.2024.83893.1323

Gao, Z., Liu, Z., Han, P., & Zhang, C. (2024). Investigating spatial-temporal trend of snow cover over the three provinces of Northeast China based on a cloud-free MODIS snow cover product. *Journal of Hydrology, 645*(Part A), 132044. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132044

Ghafarian, P., Farid Mojtahedi, N., Moradi, M., Khosh Akhlagh, F., Abed, H., & Negah, S. (2016). Studying of Regional Scale Forcing on the Spatial Pattern Formation of Heavy Snowfall Hazard in the Gilan Plain (Case Study Feb 2014). *Journal of Oceanography*, *7*(26), 85-97. [In Persian] http://joc.inio.ac.ir/article-1-977-fa.html

Haghizadeh, A., Kiani, A., & Kiani, M. (2017). Performance Evaluation of Geo-Statistical Methods to Estimate the Spatial Distribution of Snow Depth and Density in Mountainous Areas (Case Study: Gush Bala Watershed, Mashhad). *Journal of Hydrogeomorphology*, *4*(12), 45-66. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23833254.1396.4.12.3.6

Hall, D. K., Riggs, G. A., & Salomonson, V. V. (2002). MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment*, *83*(1–2), 181–194. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00095-0

Hussain, I., Ali, M., Muhammad, S., Hassan, W., Ali, S., Hussain, Z., ... & Khan, M. Y. (2023). A decline in snow cover area of Passu and Ghulkin valleys between 1995 and 2022. *Journal of Mountain Science*, *20*(12), 3542-3551. https://doi.org/10.1007/s11629-023-8037-2

Irannezhad, M., Ronkanen, A. K., & Kløve, B. (2016). Wintertime climate factors controlling snow resource decline in Finland. *International Journal of Climatology*, *36*(1).

Jems, H., Yarahmadi, D., Nasiri, A., & Mirhashemi, H. (2023). Monitoring the spatial changes of the snow cover of Central Alborz using the SVM algorithm and landsat images. *Researches in Earth Sciences*, *14*(2), 20-37. [In Persian] https://doi.org/10.48308/esrj.2023.103194

Jin, X., Ke, C. Q., Xu, Y. Y., & Li, X. C. (2015). Spatial and temporal variations of snow cover in the Loess Plateau, China. *International Journal of Climatology*, *35*(8).

Kashki, A., & Haji Mohammadi, H. (2017). Synoptic systems analysis took occurrence of heavy snow in the northern provinces of Iran A case study is January 31 to February 3, 2014. *Iran-Water Resources Research, 13*(2), 1770-181. [In Persian] https://www.iwrr.ir/article_43177.html?lang=en

Khan, A. A., & Li, X. (2025). Recent global snow cover trends using the MODIS dataset from 2000 to 2021. *Remote Sensing Applications: Society and Environment, 39*, 101662. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101662

Maryanji, Z., Toulabi Nejad, M., & Dolatshahi, Z. (2023). The effect of climate change on snowfall and its prediction in Hamadan county. *Physical Geography Research*, *55*(1), 113-129. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2023.358026.1007765

McNally, A., Arsenault, K., Kumar, S., Shukla, S., Peterson, P., Wang, S., ... & Verdin, J. P. (2017). A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications. *Scientific Data*, *4*(1), 1-19. https://doi.org/10.1038/sdata.2017.12

Montazeri, M. (2018). Frequency analysis of snowfall in Iran over the past decades. *Iran-Water Resources Research, 14*(2), 279-283. [In Persian] https://www.iwrr.ir/article_56938.html

Motiee, H., & Ahrari, S. (2022). Assessment of the effect of periodic changes on Takhte Soleiman glaciers using Google Earth Engine (GEE). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards, 9*(2), 179-194. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24237892.1401.9.2.11.9

Norooz Valashedi, R., & Bahrami Pichaghchi, H. (2023). Detection of the effect of climate change on the snow areas of the Northern Alborz Watershed by CPA method. *Watershed Engineering and Management*, *15*(3), 386-403. [In Persian] https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.357000.1937

Özdoğan, M. (2011). Climate change impacts on snow water availability in the Euphrates-Tigris basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, *15*(9), 2789-2803. https://doi.org/10.5194/hess-15-2789-2011

Passang, S., Schmidt, S., & Nüsser, M. (2022). Topographical Impact on Snow Cover Distribution in the Trans-Himalayan Region of Ladakh, India. *Geosciences*, *12*(8), 311. https://doi.org/10.3390/geosciences12080311

Roustayi, Sh., Rahimpour, T., & Nokhostin Rouhi, M. (2016). Detection of snow cover extent in the Tabriz watershed using AVHRR-NOAA satellite images. In *Proceedings of the 2nd International Congress on Earth Sciences and Urban Development (Tabriz, Iran)*. Kian Tarh Danesh Co., Research Institute of Jihad Daneshgahi, East Azerbaijan Branch. [In Persian] https://civilica.com/doc/525994/

Seifi, H. (2021). Estimation of snow cover through object-oriented techniques using image sensors OLI and TIRS (Case Study: Sabalan Mountain). *Journal Applied Researches in Geographical Sciences, 21*(63), 19-37. [In Persian] http://dx.doi.org/10.52547/jgs.21.63.19

Seydi Shahivandi, M., Omidvar, K., Mozafari, G., & Mazidi, A. (2025). Analysis of the consequences of climate change on the characteristics of middle Zagros snow cover using remote sensing data. *Journal Applied Researches in Geographical Sciences*, *25*(77), 22-43. [In Persian] http://dx.doi.org/10.61186/jgs.25.77.9

Solaimani, K., Darvishi, S., Shokrian, F., & Rashidpour, M. (2018). Monitoring of temporal-spatial variations of snow cover using the MODIS image (Case Study: Kurdistan Province). *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, *10*(3), 77-104. [In Persian] https://gisj.sbu.ac.ir/article_96603.html?lang=en

Sunita, Gupta, P. K., Petropoulos, G. P., Gusain, H. S., Sood, V., Gupta, D. K., ... & Singh, A. K. (2023). Snow cover response to climatological factors at the Beas River Basin of W. Himalayas from MODIS and ERA5 Datasets. *Sensors*, *23*(20), 8387. https://doi.org/10.3390/s23208387

Tekeli, Y., & Tekeli, A. E. (2012). A technique for improving MODIS standard snow products for snow cover monitoring over Eastern Turkey. *Arabian Journal of Geoscience, 5*, 353–363. https://doi.org/10.1007/s12517-010-0274-3

Tasdighian, M., & Rahimzadegan, M. (2017). Evaluation and improvement of snow cover detection from MODIS images. *Iran-Water Resources Research, 13*(1), 163-177. [In Persian] https://www.iwrr.ir/article_39359.html

Wei, P., Zhang, T., Zhou, X., Yi, G., Li, J., Wang, N., & Wen, B. (2021). Reconstruction of snow depth data at moderate spatial resolution (1 km) from remotely sensed snow data and multiple optimized environmental factors: a case study over the Qinghai-Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, *13*(4), 657. https://doi.org/10.3390/rs13040657

Xiao, X., & Liang, S. (2024). Assessment of snow cover mapping algorithms from Landsat surface reflectance data and application to automated snowline delineation. *Remote Sensing of Environment, 307*, 114163. https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114163

Yarahmadi, D., Fathnia, A., & Sherafat, M. (2020). The thermal evaluation of snow line and identification of potential areas of snow falling in the Alborz Mountains with NOAA-AVHRR images. *Journal Applied Researches in Geographical Sciences*, *20*(56), 193-204. [In Persian] https://doi.org/10.29252/jgs.20.56.193

Yousefizadeh, R., Sehatkashani, S., Gholamnia, K., Maleki, A., & Einali, G. (2022). Investigating the trend of changes and snow prediction in Alborz heights of Mazandaran province in winter, using satellite image processing. *Journal of Climate Research*, *1400*(48), 157-175. [In Persian] https://clima.irimo.ir/article_147865.html?lang=en

Vol.14, No.4, Winter 2025, p. 129-152 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94153.1586 OPEN ACCESS

Short-Term Droughts Projection in Iran: A Comprehensive Analysis Based on the SSP5-8.5 Scenario

Ali Reza Karbalaee[1]*, Faeze Shoja[2], Saeideh Ashrafi[3], Muhammad Kamangar[4]

[1] Assistant Professor, Department of Climatology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

[2] Postdoctoral Researcher in Climatology, Department of Physical Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

[3] Ph.D. in Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

[4] Ph.D. in Climatology, Department of Geography, Faculty of Humanities, Zanjan University, Zanjan, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 25 June 2025

Revised: 03 October 2025

Accepted: 04 October 2025

Available Online: 08 October 2025

Keywords:

Drought

Shared Socioeconomic Pathways (SSP)

Precipitation Projection

Multi-Model Ensemble

Water Resource Management

Iran

ABSTRACT

Drought is one of the greatest environmental and social challenges globally, with serious implications for food security and water resource management. This study focuses on short-term drought Projection in Iran using Shared Socioeconomic Pathways (SSP) scenarios. Data from 95 synoptic stations for 1985–2014 served as the baseline. Five General Circulation Models (GCMs) GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, and UKESM1-0-LL were used to project precipitation. The data underwent Kriging interpolation and bias correction. To reduce uncertainty, a multi-model ensemble approach was applied. Results show that ensemble-processed data align closely with observations, exhibiting reduced errors and higher correlation coefficients. The ensemble model outperformed individual models. Analysis of baseline precipitation patterns revealed strong influences from geographic and climatic factors, with high precipitation in the Zagros Mountains and southwestern Caspian Sea coasts during cold months. Projections for 2021–2040 under the SSP5-8.5 scenario indicate significant shifts: increased precipitation is expected in high-altitude regions and along the Caspian coasts, though rising temperatures may offset these benefits. Conversely, precipitation is projected to decline in northwestern and central Iran, especially in spring and summer. These changes pose significant challenges for water and agricultural management, underscoring the necessity for proactive planning. By providing more precise projections, this study supports policymakers in developing effective strategies to cope with drought.

* Corresponding author: Alireza Karbalaee E-mail address: karbalaee@khu.ac.ir

How to cite this article: Karbalaee, A. R., Shoja, F., Ashrafi, S., & Kamangar, M. (2025). Short-Term Droughts Projection in Iran: A Comprehensive Analysis Based on the SSP5-8.5 Scenario. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(4), 129-152. https://doi.org/ 10.22067/GEOEH.2025.94153.1586

©2025 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 escalating frequency of extreme climatic events represents one of the most palpable consequences of anthropogenic climate change, posing severe threats to ecosystem integrity, public health, and economic stability. Among these hazards, drought is globally recognized as the most detrimental due to its creeping onset, extensive spatial footprint, and prolonged duration. Iran, situated within the global arid and semi-arid belt, has historically contended with water scarcity. However, recent decades have witnessed a convergence of climatic shifts and managerial challenges, propelling the nation toward a pervasive water crisis. Predictive models identify Iran as a highly vulnerable region to future hydrological anomalies. While previous investigations predominantly relied on the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5), the advent of CMIP6 offers enhanced physical parameterization and higher spatial resolution. This study employs a strategic approach by utilizing CMIP6 models under the high-emission SSP5-8.5 scenario. This scenario serves as a systemic "stress test" for Iran's water resource management infrastructure, evaluating resilience against the most severe plausible climatic trajectory. The primary objective is to analyze the spatiotemporal patterns of short-term droughts for the near-future horizon (2021–2040) and to delineate critical hotspots, thereby facilitating a paradigm shift from reactive crisis management to proactive risk mitigation.

Material and Methods

The study area encompasses the entire territory of Iran. Observational data for precipitation and temperature were obtained from 95 synoptic stations for the baseline period (1985–2014) to validate model performance. For future projections (2021–2040), outputs from five CMIP6 General Circulation Models (GCMs) specifically GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2 and UKESM1-0-LL—were utilized under the SSP5-8.5 scenario. To address the scale mismatch between GCM outputs and local observations, a robust downscaling procedure was implemented using Kriging interpolation to generate a 19×19 km grid, followed by bias correction via the Delta Correction Factor (DCF) method. To mitigate structural uncertainties inherent in individual models, a weighted Multi-Model Ensemble (MME) approach was adopted, with weights assigned based on the Pearson correlation coefficients between model outputs and historical observations. The Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) was selected to characterize drought conditions, as its incorporation of potential evapotranspiration (calculated via the Thornthwaite method) makes it particularly sensitive to the thermal amplification of drought under global warming. Model accuracy and the ensemble performance were rigorously evaluated using Taylor diagrams and statistical metrics, including RMSE, MAE, MBE and R^2.

Results and Discussion

The validation analysis, utilizing Taylor diagrams and statistical metrics, demonstrated that the Multi-Model Ensemble (MME) approach significantly mitigated the structural uncertainties inherent in individual CMIP6 models. While individual models exhibited biases ranging from 28% to 78% in parameter estimation, the ensemble-adjusted data showed negligible deviations (less than 2%) and high correlation coefficients, indicating a robust alignment with baseline observational records (1985–2014).

Baseline analysis confirmed the topographic control over moisture distribution, identifying the Zagros Mountains and the Caspian coast as primary precipitation zones, in contrast to the arid central and eastern basins. However, projections for the near-future horizon (2021–2040) under the SSP5-8.5 scenario reveal critical shifts in spatiotemporal precipitation patterns. Although a potential increase in precipitation is projected for high-altitude regions and the southern Caspian coast during specific cold months (e.g., January), this trend is reversed during critical growing seasons. Notably, northwestern, central and southeastern Iran are projected to experience precipitation deficits and negative anomalies during spring and summer months.

The most pivotal finding emerges from the SPEI analysis, which underscores the thermodynamic dominance of climate change in the region. The results indicate that the substantial rise in surface temperatures and the consequent surge in atmospheric evaporative demand will likely offset any localized precipitation gains, driving a negative water balance. This phenomenon signifies a transition toward a "Hot Drought" regime, characterized by increased frequency and severity of drought events across most of the country. Spatial risk mapping identifies southern regions (such as the Persian Gulf coast), eastern, and parts of central Iran as vulnerability "hotspots." In these areas, the recurrence interval of severe droughts is projected to shorten, while wet periods diminish. These spatial patterns display strong concordance with previous literature, confirming that the primary driver of future droughts in Iran is shifting from precipitation deficits to thermal stress and intensified evapotranspiration. This trajectory poses profound challenges for rainfed agriculture and reservoir management, particularly during the warm season when water demand peaks.

Conclusion

This study demonstrates the efficacy of the Multi-Model Ensemble (MME) approach utilizing CMIP6 datasets under the SSP5-8.5 scenario in minimizing simulation uncertainties and enhancing the fidelity of short-term drought projections for Iran. The results indicate that for the 2021–2040 horizon, although precipitation patterns exhibit regional variability, the dominant climatic driver will be the substantial rise in surface temperatures; this warming trend is projected to amplify potential evapotranspiration rates, effectively negating localized precipitation gains and driving a transition toward more frequent and widespread "hot droughts." Spatiotemporal analysis identifies the southern, eastern, and central regions of the country as critical hotspots of vulnerability, where the intensification of drought severity is expected to be most pronounced. These findings underscore the imperative for a strategic paradigm shift from reactive crisis management to proactive risk management, necessitating robust policy interventions that prioritize demand-side water management, climate-adaptive agricultural practices and the implementation of advanced early warning systems to safeguard national water and food security against escalating climatic stresses.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، ص ۱۵۲-۱۲۹

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94153.1586 دسترسی آزاد

پیش‌نمایی خشکسالی‌های کوتاه‌مدت در ایران: تحلیل جامع بر اساس سناریوی SSP5-8.5

علیرضا کربلائی درئی*[۱]، فائزه شجاع[۲]، سعیده اشرفی[۳]، محمدکمانگر[۴]

[*۱] استادیار گروه آب و هواشناسی، دانشکدهٔ علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران، تهران، ایران
[۲] محقق پسادکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۳] دکتری اقلیم‌شناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
[۴] دکتری اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲

کلمات کلیدی:

خشکسالی

مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP)

پیش‌بینی بارش

همادی چند مدلی

مدیریت منابع آب

ایران

چکیده

خشکسالی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و اجتماعی جهانی است که پیامدهای جدی برای امنیت غذایی و مدیریت منابع آب دارد. این پژوهش به پیش‌بینی خشکسالی‌های کوتاه‌مدت در ایران با استفاده از سناریوهای اجتماعی - اقتصادی مشترک (SSP) می‌پردازد. داده‌های ۹۵ ایستگاه سینوپتیک در دوره ۱۹۸۵–۲۰۱۴ به‌عنوان پایه در نظر گرفته شدند. پنج مدل گردش عمومی جو (GCM) شامل GFDL-ESM4، IPSL-CM6A-LR، MPI-ESM1-2-HR و UKESM1-0-LL برای پیش‌بینی بارش به‌کار رفتند. داده‌ها با روش کریجینگ همگون‌سازی و سپس اصلاح سوگیری شدند. برای کاهش عدم قطعیت، از رویکرد همادی چندمدلی استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد داده‌های همادی‌شده هم‌خوانی بالایی با مشاهدات دارند، خطاهای کمتری ارائه می‌دهند و ضریب همبستگی آن‌ها افزایش یافته است. مدل همادی عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های منفرد داشت. تحلیل الگوهای بارش در دوره پایه نشان داد که بارش تحت تأثیر عوامل جغرافیایی و اقلیمی است و بیشترین مقادیر آن در ماه‌های سرد در زاگرس و سواحل جنوب‌غربی خزر رخ می‌دهد. پیش‌بینی‌های دوره ۲۰۲۱–۲۰۴۰ تحت سناریوی SSP5-8.5 تغییرات چشمگیری را نشان می‌دهند: افزایش بارش در مناطق مرتفع و سواحل خزر، هر چند افزایش دما ممکن است اثرات مثبت آن را کاهش دهد؛ در مقابل، کاهش بارش در شمال‌غرب و مرکز کشور، به‌ویژه در بهار و تابستان، پیش‌بینی شده است. این تغییرات چالش‌های جدی برای مدیریت آب و کشاورزی ایجاد می‌کند و لزوم برنامه‌ریزی پیشگیرانه را برجسته می‌سازد. این مطالعه با ارائهٔ پیش‌بینی‌های دقیق‌تر، به سیاست‌گذاران در تدوین راهبردهای مؤثر برای مقابله با خشکسالی کمک می‌کند.

* نویسندهٔ مسئول: علیرضا کربلائی درئی

Email: karbalaee@khu.ac.ir

مقدمه

وقوع پدیده‌های حدی آب‌وهوایی، به عنوان یکی از بارزترین پیامدهای تغییر اقلیم، می‌تواند منجر به مخاطرات طبیعی ویرانگر، تهدید یکپارچگی زیست‌بوم‌ها و تحمیل هزینه‌های سنگین بر سلامت و اقتصاد جوامع شود (Zhou, Zheng & Guo, 2021). در این میان، خشکسالی به دلیل ماهیت خزنده، دامنه تأثیر گسترده و دوره بازگشت طولانی، به عنوان زیان‌بارترین مخاطره آب‌وهوایی در سطح جهان شناخته می‌شود. این پدیده که با توجه به روندهای فزاینده دمای جهانی می‌تواند در تمامی رژیم‌های اقلیمی، حتی مناطق سردسیر، رخ دهد (Carrao, Barbosa & Dos Santos, 2018; Lanen, Van Lanen & Heggen, 2007) تأثیرات عمیقی بر امنیت آبی و غذایی و در نتیجه ثبات اقتصادی کشورها دارد (Zhang & Yao, 2012). خطر آتی ناشی از خشکسالی، ترکیبی پیچیده از تغییرات فیزیکی اقلیم و آسیب‌پذیری‌های اجتماعی-اقتصادی است که این پیامدها به طور نامتناسبی در کشورهای کمتر توسعه‌یافته، شدیدتر احساس می‌شود (Elkouk, Amiraslani & Ashraf, 2022).

ایران، به دلیل قرارگیری در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، به طور تاریخی با چالش کم‌آبی دست‌وپنجه نرم کرده است. با این حال، در دهه‌های اخیر، هم‌افزایی عواملی چون تغییرات اقلیمی، الگوهای ناپایدار مصرف و چالش‌های ساختاری در مدیریت منابع آب، کشور را در آستانه یک بحران آبی فراگیر قرار داده است. مدل‌های پیش‌بینی تغییرات آب‌وهوایی، ایران را به عنوان یکی از آسیب‌پذیرترین مناطق جهان در برابر خشکسالی‌های آتی ارزیابی کرده‌اند (World Bank Group, 2016). خشکسالی گسترده سال 2021 که منجر به بحران‌های جدی در تأمین آب بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت و بروز تنش‌های اجتماعی گردید، شاهدی آشکار بر این واقعیت است که رویکردهای سنتی مبتنی بر مدیریت بحران و واکنش پس از وقوع، دیگر پاسخگوی شدت و تکرار این پدیده نیست. این شرایط، ضرورت یک تحول پارادایمی به سمت مدیریت ریسک را آشکار می‌سازد؛ رویکردی که بر پایه پیش‌بینی علمی، سامانه‌های هشدار سریع و افزایش تاب‌آوری استوار باشد (Zarrin, Dadashi-Roudbari & Kadkhoda, 2022).

سنگ بنای چنین رویکرد پیشگیرانه‌ای، درک علمی و پایش دقیق الگوهای مکانی-زمانی خشکسالی است که از تحلیل توصیفی اولیه (Whipple, 1966) به استفاده از شاخص‌های کمی دقیق تغییر پیدا کرده است. وجود یک شاخص مشخص برای تعیین دوره‌های مرطوب و خشک، گامی اساسی در تحلیل کمی خشکسالی محسوب می‌شود (Silva, 2003) و انتخاب شاخص مناسب، نقشی کلیدی در اثربخشی سامانه‌های پایش ایفا می‌کند (Farahmand & Agha Kouchak, 2015). در این راستا، مطالعات متعددی در سطح جهانی و منطقه‌ای با بهره‌گیری از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) متعلق به پروژه‌هایی مانند CMIP5 و سناریوهای واداشت تابشی (RCPs)، به بررسی تغییرات اقلیمی پرداخته‌اند (Nasrollahi et al., 2015; Lu, Carbone & Grego, 2019; Khan, Koch & Tahir, 2020; Alemu, Wubneh, Worku, Womber & Chanie, 2023). با این حال، علم اقلیم با معرفی نسل جدید مدل‌ها در قالب فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP6)، گام بلندی به پیش برداشته است. این مدل‌های نوین با بهبود فرآیندهای فیزیکی، افزایش وضوح مکانی و تلفیق سناریوهای مسیرهای اجتماعی - اقتصادی مشترک (SSPs) با مسیرهای غلظت نماینده (RCPs) تصویری واقع‌بینانه‌تر و دقیق‌تر از آیندهٔ اقلیم ارائه می‌دهند (Eyring et al., 2016; O'Neill et al., 2016).

شواهد علمی رو به رشدی، برتری عملکرد مدل‌های CMIP6 را در شبیه‌سازی پدیده‌های حدی اقلیمی تأیید می‌کند. برای مثال، ژو و همکاران (Zhu et al., 2020) نشان دادند که مدل‌های CMIP6 در بازتولید شرایط حدی در چین، عملکرد بهتری نسبت به CMIP5 دارند. یو و همکاران (You et al., 2021) نیز با استفاده از همین مدل‌ها، افزایش قابل توجه دما در نواحی مختلف چین را پیش‌بینی کردند. در سطح منطقه‌ای، مطالعاتی مانند پژوهش آیوگی و همکاران (Ayugi et al., 2021) در شرق آفریقا و آلمازرویی و همکاران (Almazroui et al., 2021) در آمریکای جنوبی، همگی بر تشدید پدیده‌های حدی تحت سناریوهای مختلف SSPتأکید دارند. در حوزه خاص خشکسالی نیز، پژوهشگران به طور فزاینده‌ای از داده‌های CMIP6 برای پیش‌نگری‌های آتی بهره گرفته‌اند (Cook et al., 2020; Li et al., 2020; Zhao & Dai, 2022; Chen et al., 2023). با این حال، همانطور که لی و همکاران

(Li, Liu, Huang, Peng & Ling, 2022) به درستی اشاره کرده‌اند، هیچ مدل منفردی در تمامی مناطق عملکرد بهینه ندارد و ارزیابی و کاربرد این مدل‌ها برای هر منطقه جغرافیایی خاص، یک ضرورت پژوهشی است.

با وجود حجم قابل‌توجه مطالعات پیشین در زمینه خشکسالی در ایران، بررسی دقیق این آثار (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021; Babaeian et al., 2021; Ahadi et al., 2025) نشان‌دهندهٔ یک شکاف علمی مشخص است که پژوهش حاضر مستقیماً به آن می‌پردازد. این شکاف در دو لایه قابل تبیین است؛ لایهٔ روش‌شناختی و لایهٔ راهبردی. در لایهٔ روش‌شناختی، اگرچه استفاده از مدل‌های نوین CMIP6 در حال گسترش است (Behzadi et al., 2024)، اما بسیاری از تحلیل‌های جامع و ملی‌نگر همچنان بر پایه داده‌های نسل قدیم (CMIP5) استوار بوده و یا مطالعات مبتنی بر CMIP6 به مقیاس‌های مکانی محدود (مانند حوضهٔ آبریز یا یک کلان‌شهر) پرداخته‌اند (Khazaei, 2025؛ Zarrin et al., 2022). این امر از دستیابی به یک چشم‌انداز یکپارچهٔ ملی مبتنی بر دقیق‌ترین ابزارهای موجود جلوگیری می‌کند.

اما نوآوری اصلی این پژوهش در لایهٔ راهبردی آن نهفته است. در شرایطی که ایران با یک بحران ساختاری آب مواجه است، تحلیل‌های آینده‌نگر اقلیمی باید از یک تمرین علمی صرف فراتر رفته و به ابزاری برای مدیریت ریسک و آزمون تاب‌آوری تبدیل شوند. از این منظر، تمرکز غالب پژوهش‌ها بر سناریوهای میانه‌رو، هرچند ارزشمند، اما برای آماده‌سازی کشور در برابر شوک‌های شدید اقلیمی کافی نیست. پژوهش حاضر با انتخاب سناریوی پرانتشار SSP5-8.5، این مسیر را به عنوان یک «سناریوی آزمون تنش» برای سیستم مدیریت آب کشور در نظر می‌گیرد. هدف، پاسخ به این پرسش کلیدی است که زیرساخت‌ها، الگوهای کشت و ساختارهای اجتماعی - اقتصادی فعلی تا چه حد در برابر بدترین آیندهٔ محتمل اقلیمی آسیب‌پذیر هستند. این رویکرد، تحلیل خشکسالی را مستقیماً به حوزه سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی برای شرایط بحرانی پیوند می‌زند.

بنابراین، مطالعه حاضر با هدف ارائه یک تحلیل جامع ملی، مبتنی بر جدیدترین مدل‌های اقلیمی و با یک رویکرد راهبردی مدیریت ریسک، به دنبال پاسخگویی به پرسش‌های اساسی زیر است که در ابعاد مختلف تفکیک شده‌اند:

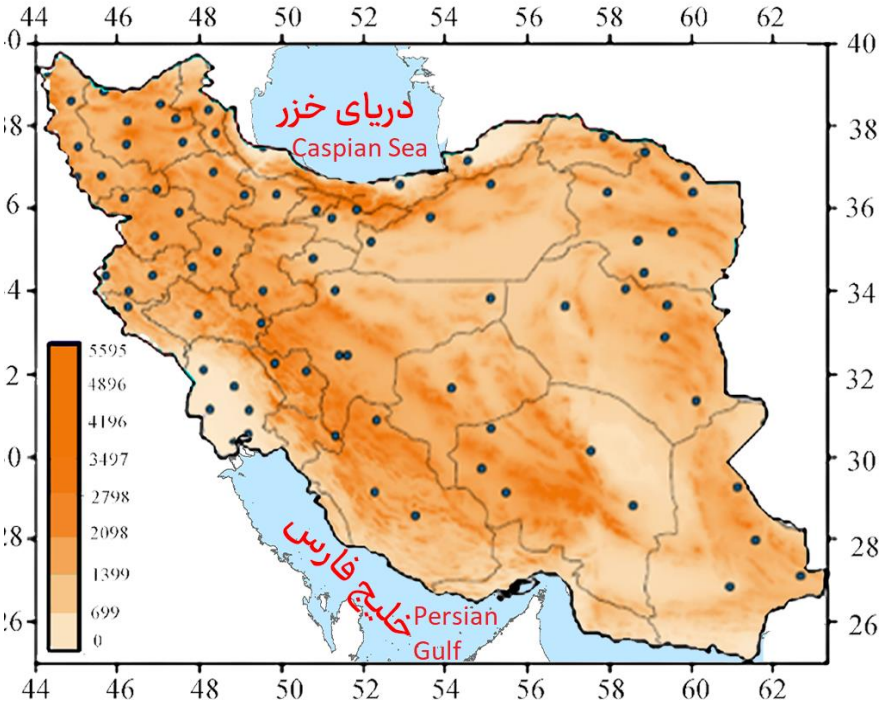
- الگوهای زمانی و مکانی مشخصه‌های کلیدی خشکسالی کوتاه‌مدت (فراوانی، شدت و مدت) در ایران تحت سناریوی SSP5-8.5 در افق‌های زمانی آینده (نزدیک، میانی و دور) چگونه تکامل خواهند یافت؟
- بر اساس این پیش‌نمایی کدام مناطق، با بیشترین ریسک تشدید خشکسالی مواجه شده و به کانون‌های بالقوهٔ بحران آب در آینده تبدیل می‌شوند؟
- دلالت‌های کاربردی یافته‌های این پژوهش برای بازنگری در سیاست‌های تخصیص آب، تقویت زیرساخت‌های مقابله با خشکسالی و طراحی سامانه‌های هشدار سریع مؤثر در سطح ملی و منطقه‌ای چیست؟

در ادامهٔ پژوهش، با تکیه بر تحلیل‌های آماری و مکانی، به این پرسش‌ها پاسخ داده می‌شود تا یک چشم‌انداز جامع از آسیب‌پذیری کشور در برابر خشکسالی‌های آتی ترسیم گردد.

منطقهٔ مورد مطالعه

محدودهٔ مورد مطالعه کشور ایران در جنوب غرب آسیا بین عرض‌های جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی با مساحت ۱,۶۴۸,۱۹۵ کیلومترمربع است (شکل ۱). به علت گستردگی ایران‌زمین و وجود عوامل متعدد جغرافیایی از یک طرف و از طرف دیگر قرارگیری در محل گذار سامانه‌های متفاوت گردش جوی، تنوع اقلیمی در سرتاسر آن وجود دارد. ایران از لحاظ دمایی به دو بخش سرد کوهستانی و گرم کم ارتفاع تقسیم می‌شود. میانگین دمای کشور حدود ۱۸ درجه سانتی‌گراد است. حاکمیت سامانه‌های همدید، نظیر کم‌فشار گنگ و پرفشار آزور از یک‌سو و محتوای رطوبتی جو نیز از سوی دیگر در شکل‌گیری نواحی دمایی ایران نقش دارند (Masoudian & Kaviani, 2008). وضعیت دمایی ایران در تابستان همگن‌تر از زمستان است. میانگین بارش سالانه در ایران حدود ۲۵۰ میلی‌متر است که ایران را جزو کشورهای خشک دنیا قرار داده است.

در دورهٔ سرد سال، به علت حاکمیت بادهای غربی و نزدیکی به منبع رطوبتی دریای مدیترانه بارندگی زیادی دارد، اما دورهٔ گرم سال نفوذ پرفشار آزور باعث کاهش بارندگی می‌شود. توزیع زمانی و مکانی باران در کشور نیز پراکندگی یکسانی ندارد. بیشترین مقدار بارش‌ها مربوط به کرانه‌های جنوبی دریای خزر و کمترین مقدار مربوط به بیابان‌های مرکزی لوت و کویر نمک است (Alijani, 2011).



شکل ۱– نقشهٔ موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه

Fig.1. The Map of the Study Area

مواد و روش‌ها

الف)داده‌های ایستگاهی

در این پژوهش داده‌های زمینی ۹۵ ایستگاه همدیدی در دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴ به عنوان دورهٔ پایه استفاده و پردازش شده است. در انتخاب ایستگاه‌ها افزون بر لحاظ نمودن مناطق آب‌وهوایی گوناگون کشور سعی شد تا ایستگاه‌هایی که خلأ آماری کمتر داشته و به لحاظ کیفی آزمون‌های کمی را گذارنده اند استفاده شود. پراکندگی ایستگاه‌های زمینی مورد مطالعه در شکل ۱ دیده می‌شود.

ب) داده‌های مدل‌های اقلیمی (CMIP6)

برای پیش‌نگری پارامترهای اقلیمی دوره مشاهداتی، GCMهای فاز ششم پروژه مقایسه‌ای مدل جفت شده (CMIP6) مورد استفاده قرار گرفت. پروژهٔ مقایسهٔ مدل‌های جفت شده گزارش ششم هیئت بین دولتی تغییر اقلیم از سناریوهای جدیدی به نام مسیرهای اجتماعی و اقتصادی مشترک (SSP) استفاده می‌کند که با نماینده خطوط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCP) پروژه گزارش پنجم IPCC ترکیب شده است (Eyring et al., 2016). سناریوهای جدید اضافه شده در CMIP6 شامل SSP1-1.9 ، SSP4-3.4، SSP3-7.0 هستند که چهار سناریوی SSP1-2.6 ، SSP2-4.5، SSP4-6.0 و SSP5-8.5 نیز به روزشده سناریوهای RCP2.6 ، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5 موجود در CMIP5 می‌باشند که در این مطالعه از سناریو SSP5-8.5 بهره گرفته شد. مدل‌های

آب‌وهوایی فعلی قوی‌تر از مجموعه‌های قبلی CMIP هستند و پیشرفت‌های مؤثری را در بازتولید الگوهای بزرگ مقیاس متغیرهای آب‌وهوایی نشان داده‌اند (Chen et al., 2020; Akinsanola, Kooperman, Pendergrass, Hannah & Reed, 2020; Zhai et al., 2020; Wang, Jin & Liu, 2020). در تحقیق حاضر نیز خروجی ۵ GCMs شامل MRI-ESM2 ، IPSL-CM6A-LR، UKESM1-0-LL، MPI-ESM1-2-HR و GFDL-ESM4 برای دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۸۵) و شبیه‌سازی‌های آینده شامل آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱)، از وب سایت پروژه مقایسه مدل جفت شده گزارش ششم به آدرس https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/ دریافت گردید. انتخاب مدل‌های نهایی بر اساس یک رویکرد چندمعیاره دقیق صورت پذیرفت که شامل در دسترس بودن کامل داده‌ها برای دوره‌های تاریخی و سناریوهای آینده، عملکرد مطلوب و اثبات‌شده در شبیه‌سازی اقلیم ایران بر اساس مطالعات پیشین و پوشش طیف متنوعی از حساسیت‌های اقلیمی (Climate Sensitivity) به‌منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در پیش‌بینی‌ها بود. علاوه بر این، تمرکز ویژه‌ای بر انتخاب مدل‌های سیستم زمین (ESMs) قرار گرفت؛ این نسل از مدل‌ها با شبیه‌سازی چرخه‌های بیوژئوشیمیایی حیاتی مانند چرخه کربن، فراتر از فرآیندهای صرفاً فیزیکی در GCMs عمل کرده و در نتیجه، بازنمایی کامل‌تر و یکپارچه‌تری از سیستم اقلیم زمین ارائه می‌دهند. فرایند انتخاب مدل‌ها بر مبنای یک رویکرد چندمعیاره دقیق صورت پذیرفت که علاوه بر دسترس بودن کامل داده‌ها، عملکرد مطلوب و مستند شده آن‌ها در منابع علمی را نیز مد نظر قرار می‌داد. مدل‌های منتخب و مراجع اصلی توسعه‌دهنده آن‌ها عبارتند از: GFDL-ESM4 (Sentman et al., 2018)، IPSL-CM6A-LR, (Boucher et al., 2020)، MPI-ESM1-2-HR (Müller et al., 2018)، UKESM1-0-LL, (Sellar et al., 2020) و MRI-ESM2-0 (Kawai et al., 2019; Oshima et al., 2020). حساسیت اقلیمی معمولاً به‌عنوان افزایش دمای جهانی پس از دو برابر شدن غلظت CO2 در جو در مقایسه با سطوح پیش از صنعتی شدن تعریف می‌شود CO2 قبل از صنعتی حدود ۲۶۰ قسمت در میلیون (ppm) بود، بنابراین دو برابر شدن آن تقریباً ۵۲۰ ppm خواهد بود. جزئیات مربوط به مدل‌ها و مؤسسه‌های توسعه دهندهٔ آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مدل‌های مورد استفاده جهت همادی و پیش‌نگری خشکسالی

Table 1- Models Used for Drought Monitoring and Forecasting

مدل Model	نام مؤسسه Institute Name	قدرت تفکیک مکانی تقریبی Approximate Spatial Resolution	کشور Country	واریانت Variant
MRI-ESM2	مؤسسه تحقیقات هواشناسی Meteorological Research Institute (MRI) |	1.25 ⁎1.25	ژاپن Japan	r1i1p1
IPSL-CM6A-LR	Institut pierre-simon laplace موسسه پیر سیمون لاپلاس	2.5 ⁎1.26	فرانسه France	r1i1p1
UKESM1-0-LL	مرکز هادلی مت آفیس Met Office Hadley Center	2.25 ⁎2.25	انگلیس UK	r1i1p1
MPI-ESM1-2-HR	مؤسسه ماکس پلانک Max Planck Institute	0.94 ⁎0.94	آلمان Germany	r1i1p1
GFDL-ESM4	آزمایشگاه دینامیک سیالات ژئوفیزیکی Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	1.25 ⁎1/0	امریکا USA	r1i1p1

استخراج، باز شبکه‌بندی و تصحیح اریبی داده‌ها

درگام نخست داده‌های مدل‌های مورداستفاده در نزدیک‌ترین نقاط به ایستگاه‌های همدیدی استخراج گردید. پس از این مرحله و برای یکسان‌سازی ابعاد پیکسل های نقشه‌های حاصل از مدل‌ها و داده‌های زمینی اقدام به شبکه‌بندی داده‌های زمینی و نیز داده‌های مستخرج از مدل‌ها گردید. برای باز شبکه‌بندی داده‌ها از روش کریجینگ استفاده شد. با بررسی‌های انجام‌شده قدرت تفکیک مکانی ۱۹ کیلومتری برای ابعاد پیکسل‌ها مناسب تشخیص داده شد؛ بنابراین با انجام شبکه‌بندی، پیکسل‌هایی با ابعاد ۱۹ کیلومتر در ۱۹ کیلومتر به دست آمد. سپس با استفاده از داده‌های بارش مدل‌های مورد استفاده ریزمقیاس سازی با روش تغییر عامل دلتا (DCF) برای پیکسل‌های مذکور، به شرح زیر انجام شد. جهت تصحیح اریبی مدل‌ها از روش تغییر عامل دلتا (DCF) استفاده شد. شرح محاسباتی روش DCF در رابطه (۱) آمده است (Hamidianpour & Shoja, 2022).

$$T_{frc}^{BC}(t) = P_{obs}(t), \left[\frac{\mu_m P_{frc}(t)}{\mu_m P_{conter}(t)} \right] \quad (۱)$$

در رابطهٔ فوق، T (متغیر موردنظر) است؛ contr تعداد سری‌های شبیه‌سازی‌شده CMIP6-DCCP در طول دوره کنترل است، obs دوره زمانی مشاهداتی؛ f سری زمانی پیش‌بینی‌شده آینده که باید اریبی آن تصحیح شود؛ BC سری زمانی پیش‌نگری شده آینده که اریبی آن تصحیح‌شده است، t گام زمانی و μ_m میانگین بلندمدت ماهانه است. پس از مرحله ریزمقیاس نمایی، خطای مدل‌ها با استفاده از روش‌های متعددی نظیر RMSE، MAE، MBE و R^2 محاسبه و موردبررسی قرار گرفت.

تمام مراحل ذکرشده در بالا در محیط برنامه‌نویسی متلب کد نویسی شده است و داده‌ها و کد آن از این لینک[1] قابل‌استفاده است.

روش همادی چندمدلی(Multi-Model Ensemble)

خروجی GCMs به طور ذاتی با سوگیری‌ها (Biases) و عدم قطعیت‌های ساختاری همراه است. به منظور کاهش این عدم قطعیت‌ها و دستیابی به یک برآورد پایدارتر و قابل اعتمادتر از شرایط اقلیمی آینده، در این پژوهش از رویکرد همادی چندمدلی مبتنی بر روش میانگین وزنی استفاده شد. منطق اصلی این روش، تخصیص وزن بیشتر به مدل‌هایی است که توانایی بالاتری در بازتولید شرایط اقلیمی دورهٔ تاریخی (دورهٔ مشاهداتی) از خود نشان داده‌اند و در مقابل، کاهش سهم مدل‌های با عملکرد ضعیف‌تر در برآورد نهایی است.

بر این اساس، برونداد نهایی سامانه همادی از طریق محاسبه میانگین وزنی خروجی تمام مدل‌ها، مطابق با رابطه (۲) به دست آمد:

$$w^T x^j = \sum_{k=1}^{K} w_k x_k^i \quad (۲)$$

که در آن w_k وزن داده‌های هر کدام از مدل‌ها و x_k داده برآورد شده از مدل است (Bai et al., 2020). در ادامه به‌منظور تعیین وزن داده‌های حاصل از هر مدل از روش همبستگی پیرسون بهره گرفته شد. زیرا توانایی مدل در شبیه‌سازی الگوی نوسانات زمانی متغیر اقلیمی را به خوبی ارزیابی می‌کند. برای نرمال‌سازی این ضرایب و تبدیل آن‌ها به وزن‌های استاندارد که مجموعشان برابر با یک باشد، از رابطه (۳) استفاده گردید (Kamangar, Ahmadi, Rabiei-Dastjerdi & Hazbavi, 2025) :

$$w_k = \frac{r_k}{\sum_{k=1}^{K} r_k} \quad (۳)$$

در این رابطه r_k ضریب همبستگی پیرسون برای هر مدل است.

1- https://github.com/poyan2021/ensemble2.git

این فرایند تضمین می‌کند که سهم هر مدل در برآورد نهایی، متناسب با عملکرد نسبی آن در مقایسه با سایر مدل‌های عضو سامانه همادی باشد و در نتیجه، برونداد نهایی به سمت واقع‌بینانه‌ترین پیش‌بینی سوق داده شود.

درستی‌سنجی برون‌داد سامانه همادی و مدل‌های عضو سامانه

برای درستی سنجی برونداد مستقیم مدل‌ها از نمودار تیلور استفاده شد. نمودار تیلور ابزار مناسبی جهت درستی سنجی برون‌داد مجموعه مدل‌های اقلیمی است و اخیراً در مطالعات اقلیم‌شناسی بسیار استفاده می‌شود (Wehner, 2013). نمودار تیلور بر مبنای ارتباط هندسی بین ضریب همبستگی، انحراف معیار و خطای جذر میانگین مربعات[1] استوار است. نمودار تیلور به دو صورت نیم‌دایره نمایش همبستگی منفی و مثبت و ربع دایره فقط نمایش همبستگی مثبت ارائه می‌شود که در هر دو صورت، مقادیر ضریب همبستگی به‌صورت شعاع دایره روی قوس آن، مقادیر انحراف معیار به‌صورت دوایر متحدالمرکز نسبت به نقطهٔ مرجع و RMSD به‌صورت دوایر متحدالمرکز نسبت به مرکز دایره ترسیم می‌شود. دایرهٔ توخالی روی محور افقی نقطهٔ مرجع موقعیت ایستگاه زمینی را بر اساس انحراف معیار سری زمانی نشان می‌دهد. روش ارزیابی در این دیاگرام به این صورت است که موقعیت مکانی هر مدلی که به نقطه مرجع نزدیک‌تر باشد دقت بیشتری را دارد (Azizi, Safarrad, Mohammadi & Faraji Sabokbar, 2016).

شاخص خشک سالی هواشناسی SPEI

شاخص بارش - تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد[2] (SPEI)، توسط ویسنت - سررانو و همکاران (Vicente-Serrano, Beguería & López-Moreno, 2010) ارائه شد و به‌عنوان یک شاخص خشک‌سالی اقلیمی معرفی گردید. این شاخص مبتنی بر محاسبهٔ ترازمندی آب اقلیمی[3] است و برای محاسبه به داده‌های ماهانهٔ بارندگی و دمای هوا نیاز دارد.

SPEI علاوه بر بارش (P) ، اثر دما را از طریق متغیر تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) لحاظ می‌کند که آن را برای تحلیل اثرات تغییر اقلیم مناسب‌تر می‌سازد. مراحل محاسبهٔ شاخص به شرح زیر است:

شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف از معادله ساده بیلان آب یعنی تفاوت بین بارندگی و تبخیر و تعرّق پتانسیل براساس رویکرد تورنت وایت به دست می‌آید. با در نظر گرفتن تبخیر و تعرّق پتانسیل (PET) تفاوت بین بارندگی (P) و تبخیر و تعرّق پتانسیل برای ماه (i) مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌گردد:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (۴)$$

مقادیر D در مقیاس‌های زمانی مختلف نیز از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$D_n^k = \sum_{n=0}^{k-1} F_{n-1} - PET_{n-i} \quad (۵)$$

در رابطهٔ بالا، k (ماه‌ها) مقیاس زمانی مورد نظر و n ماه مورد نظر در محاسبه است. یک توزیع سه پارامتری برای محاسبه شاخص خشکسالی نیاز است تا بتواند مقادیر منفی در داده‌های D را پوشش دهد. نتایج انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع نشان داده است که تابع لجستیک لگاریتمی برازش خوبی بر سری زمانی داده‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف دارد. فرم کلی تابع چگالی احتمال این تابع به‌صورت رابطه (۶) می‌باشد (Vicente-Serrano et al., 2010):

1- Root-Mean-Square Deviation (RMSD)
2- Standardized Precipitation minus Evapotranspiration Index
3- Climatic Water Balance

$$F(X) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{X-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}\left[1+\left(\frac{X-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2} \quad (۶)$$

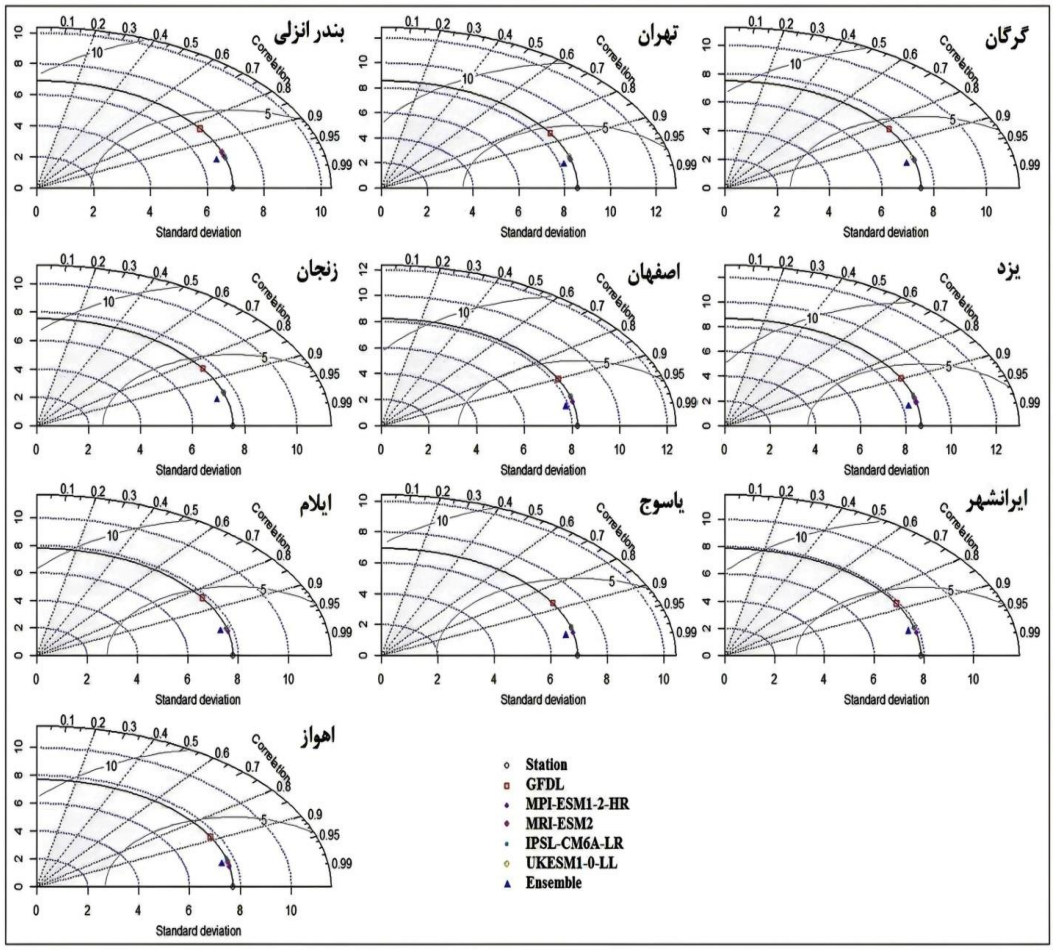
که در آن α، β و γ به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و اصلی برای مقادیر Di در دامنه $\gamma > D < \infty$ مـی‌باشـند.
بدین ترتیب پس از محاسبه تابع توزیع تجمعی و تبدیل آن به مقادیر نرمال مقادیر شاخص SPEI استخراج می‌گردد. شاخص SPEI می‌تواند در مقیاس‌های زمانی مختلف مانند ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماه محاسبه گردد. مقادیر مثبت SPEI بیانگر مثبت بودن بیلان آب و مقادیر منفی آن بیانگر منفی بودن بیلان آب است. این شاخص می‌تواند برای پایش دوره‌های خشک و مرطوب مورد استفاده قرار گیرد. خشکسالی هنگامی شروع می‌گردد که مقادیر شاخص به منفی یک برسد و با مثبت شدن آن خاتمه می‌یابد. در جدول ۲ طبقات مختلف شاخص SPEI ارائه شده است.

جدول ۲- طبقات مختلف شاخص خشکسالی SPEI
Table 2- Classification of the SPEI drought index

طبقه‌بندی classification	مقدار Value
ترسالی بسیار شدید Extremely Wet	≥ 2
رطوبت شدید Very Wet	1.5 to 1.99
رطوبت متوسط Moderate Wet	1.00 to 1.49
نرمال Normal	-0.99 to 0.99
خشکسالی متوسط Moderate Dry	-1.00 to -1.49
خشکسالی شدید Very Dry	-1.50 to -1.99
خشکسالی بسیار شدید Extremely Dry	≤ -2

نتایج

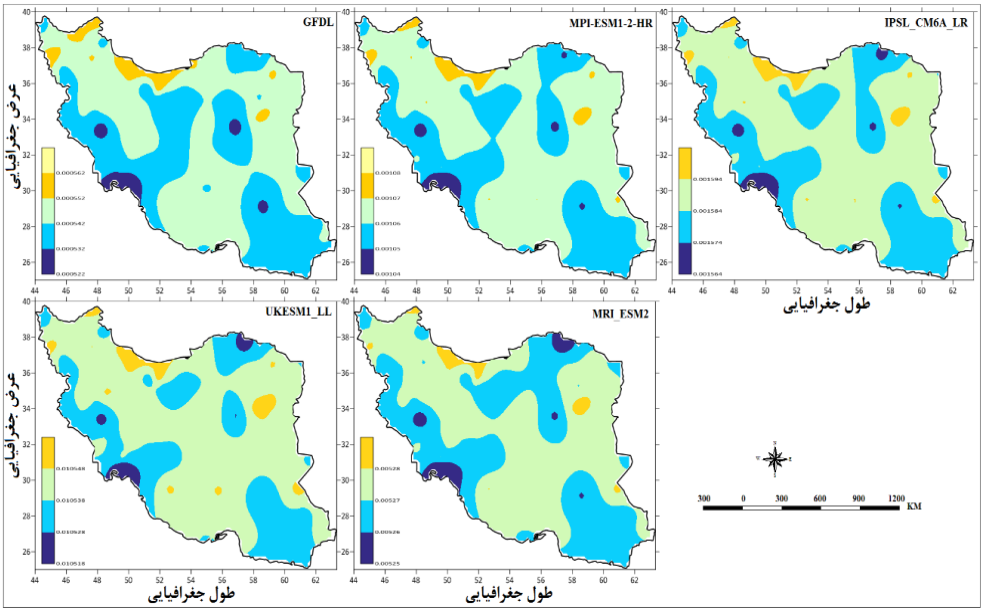
به دلیل بالا بودن تعداد ایستگاه‌های مورد استفاده در این پژوهش، ۱۰ ایستگاه به‌عنوان نماینده از تمامی پهنه‌های اقلیمی مختلف کشور انتخاب صحت سنجی داده‌های مدل و روش همادی مورداستفاده بر روی آن‌ها انجام شد. در انتخاب ایستگاه‌های مذکور نواحی اقلیمی کشور مدنظر بوده و ایستگاه‌های منتخب نماینده‌ی نواحی اقلیمی خود بوده‌اند. شکل ۲ نمودار تیلور دما برای ایستگاه‌های منتخب را نشان می‌دهد. با بررسی نمودارهای مذکور می‌توان دریافت که در تمامی ایستگاه‌ها داده‌های همادی شده بالاترین شباهت را به داده‌های واقعی داشته است. کمتر بودن میزان خطا و انحراف معیار و بالاتر بودن میزان ضریب همبستگی تأییدی بر این ادعاست. بنابراین می‌توان گفت که همادی داده‌ها توانسته است خطای داده‌های برآوردی را تا حد مطلوبی کاهش دهد.



شکل ۲- نمودار تیلور برای ایستگاه‌های منتخب کشور برای داده‌های بارش

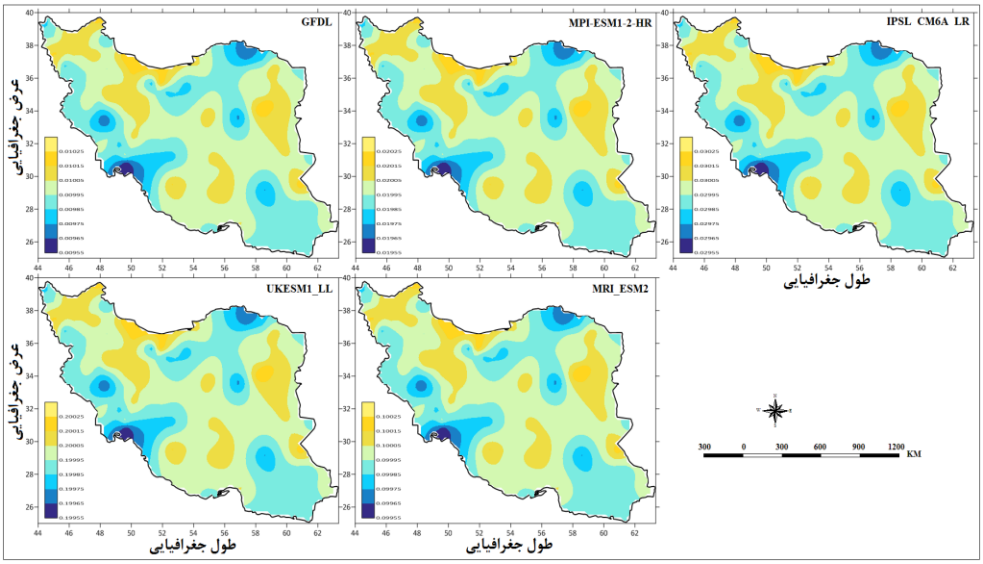
Fig.2. Taylor diagram for selected stations based on precipitation data

پس از انجام اصلاح اریبی و سپس همادی داده‌های حاصل از مدل‌ها، مقادیر خطا برای داده‌های مدل‌ها و نیز داده‌های همادی شده به دست آمد. شکل‌های ۳ تا ۶ مقادیر خطای محاسبه شده برای بارش مدل‌های مختلف در دورهٔ پایه را نشان می‌دهند. خطاهای به‌دست آمده برای بارش بسیار کوچک و قابل اغماض هستند. میزان R^2 نیز برای ایستگاه‌های مورد استفاده بین ۰/۵ تا ۱ به‌دست آمده است. پس از همادی داده‌های برآورد شده بارش، میزان خطاها کاهش یافته است. مقدار پایین یا بالای خطا می‌تواند ناشی از چندین عامل از جمله تفکیک افقی مدل‌ها، برهمکنش دریا - خشکی و عدم برآورد صحیح مدل برای متغیر دما باشد. در مجموع، روش Ensemble نسبت به پنج مدل دیگر عملکرد بهتری ارائه داده است. با این حال، باید در نظر داشت که سنجه RMSE (شکل ۳) تحت تأثیر مقدار خود متغیر قرار می‌گیرد و بنابراین به‌تنهایی نمی‌تواند سنجه مناسبی برای تحلیل نتایج درستی سنجی باشد. به‌طور کلی، مدل‌های مورد بررسی حداقل ۲۸.۷ درصد کمتر و حداکثر ۷۸.۷ درصد بیشتر از مقدار واقعی دما را در ایران برآورد می‌کنند. میزان برآورد کمتر و بیشتر از مقدار واقعی در داده‌های همادی‌شده به ترتیب ۱ و ۱.۹ درصد است که نشان‌دهندهٔ توانایی روش به کار رفته برای همادی مدل‌هاست. سنجه‌های MAE (شکل ۴) و MBE (شکل ۵) نیز حاکی از کمینه بودن مقادیر خطا برای داده‌های برآورد شده از طریق مدل‌ها هستند. نتایج بررسی میزان خطا برای داده‌های همادی شده (شکل ۶) نیز نشان دهندهٔ توانایی بالای روش به کار برده شده برای همادی داده‌های حاصل از مدل‌ها و کاهش محسوس میزان خطاهاست.



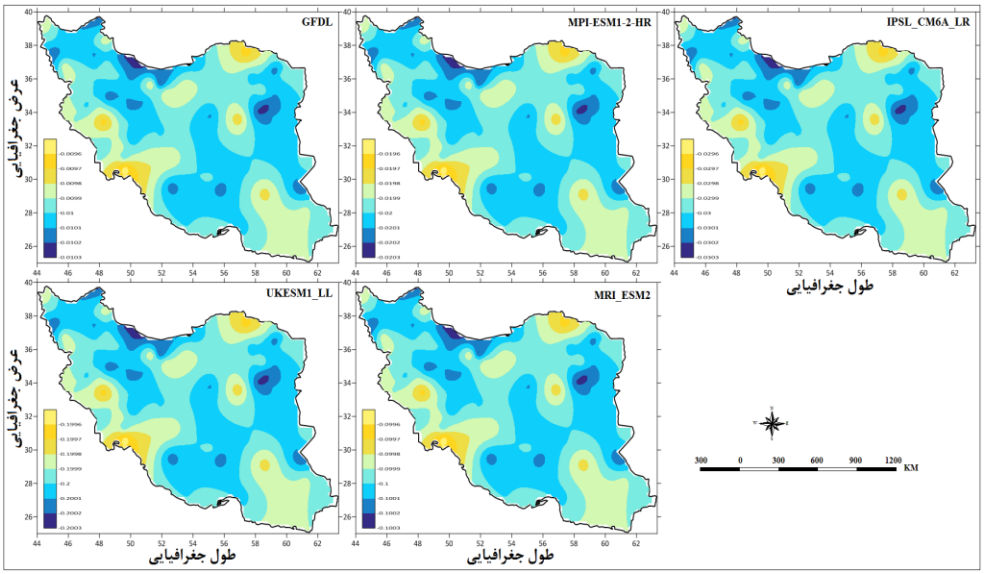
شکل۳- خطای RMSE بارش برآورد شده از طریق مدل‌های مختلف

Fig.3. RMSE of precipitation estimated by different models



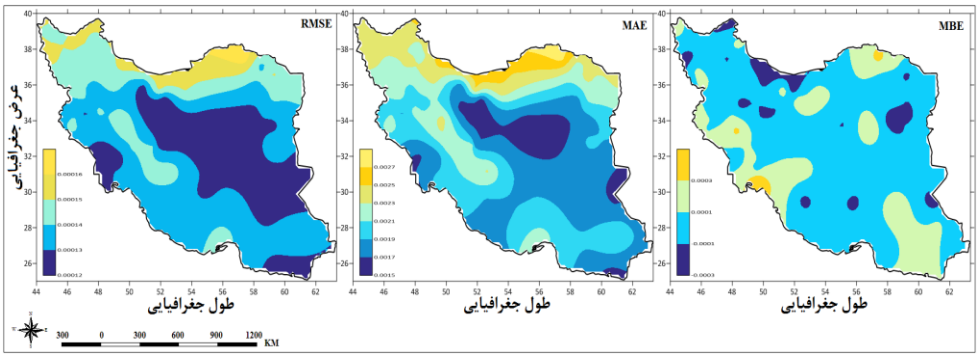
شکل۴- خطای MAE بارش برآورد شده از طریق مدل‌های مختلف

Fig.4. MAE of precipitation estimated by different models



شکل۵- خطای MBE بارش برآورد شده از طریق مدل‌های مختلف

Fig.5. MBE of precipitation estimated by different models



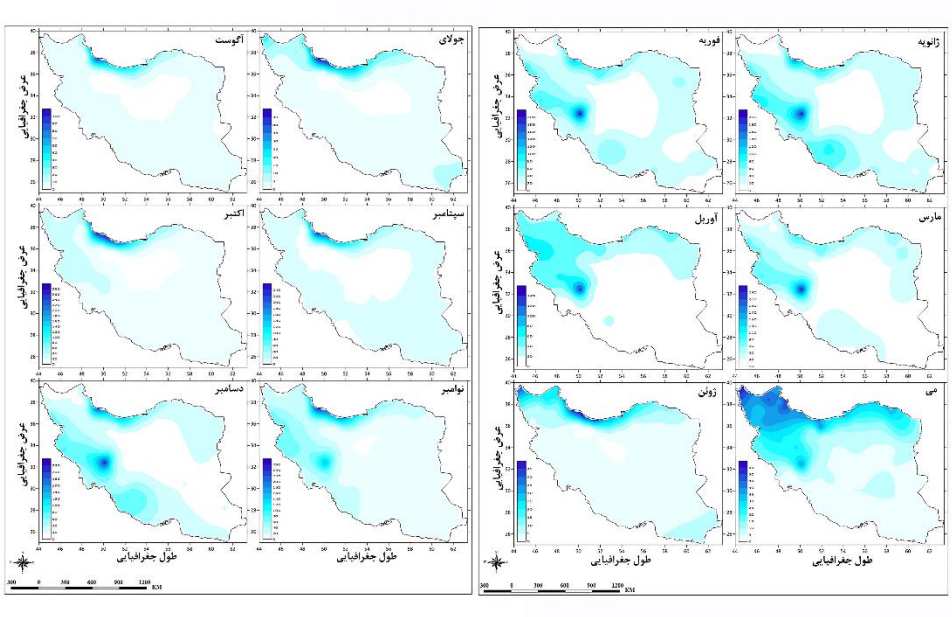
شکل ۶- خطاهای مختلف بارش همادی شده‌ی مدل‌های مختلف

Fig.6. Various errors of calibrated precipitation from different models

بارش - دورهٔ پایه

شکل ۷ توزیع مکانی - زمانی میانگین بارش ماهانه ایران را در دورهٔ پایه نشان می‌دهد. بررسی این نقشه‌ها بیانگر وجود الگوهای بارشی کاملاً فصلی و منطقه‌ای است که تحت تأثیر برهم کنش پیچیدهٔ سامانه‌های بزرگ‌مقیاس جوی، توپوگرافی ناهمگون کشور و منابع رطوبتی اطراف (دریای خزر، خلیج فارس و دریای عمان) شکل گرفته‌اند. در فصل سرد (دسامبر تا مارس) که اصلی‌ترین دوره بارش در ایران به‌شمار می‌رود، دو کانون اصلی بارشی دیده می‌شود. کانون نخست در زاگرس میانی و جنوبی قرار دارد که بیشترین بارش‌های کشور را دریافت می‌کند. مقادیر بارش در این منطقه به‌طور متوسط بین ۱۵۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر در ماه و در برخی لکه‌ها بیش از ۳۰۰ میلی‌متر است. این شرایط ناشی از صعود اجباری هوای مرطوب مدیترانه‌ای و سودانی بر دامنه‌های زاگرس است. کانون دوم در سواحل جنوبی دریای خزر متمرکز است که بارش‌های سنگینی در محدودهٔ ۲۵۰ تا بیش از ۳۰۰ میلی‌متر در ماه ثبت کرده است. این بارش‌ها علاوه بر سامانه‌های غربی، تحت تأثیر رطوبت دریا و نفوذ زبانه‌های پرفشار سیبری رخ می‌دهد. در مقابل، مناطق مرکزی، شرقی و جنوب شرقی کشور در این دوره بارش اندکی، عموماً کمتر از ۲۰ تا ۳۰

میلی‌متر در ماه، دارند. در فصل بهار (آوریل و مه) با عقب‌نشینی سامانه‌های باران‌زای غربی به عرض‌های شمالی‌تر، بارش در زاگرس کاهش می‌یابد و در محدوده ۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر در ماه قرار می‌گیرد. با این حال، شمال‌غرب کشور و دامنه‌های البرز غربی به کانون‌های تازه بارش تبدیل می‌شوند که بارش‌های همرفتی در این مناطق مقادیر ۶۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر در ماه را رقم می‌زنند. در همین زمان، بارش در نیمه مرکزی و جنوبی ایران به‌شدت کاهش یافته و اغلب کمتر از ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر باقی می‌ماند. فصل گرم و خشک (ژوئن تا سپتامبر) با استیلای پرفشار جنب‌حاره‌ای بر ایران مشخص می‌شود. در این دوره، بارش در بیشتر مناطق کشور تقریباً به صفر می‌رسد و مقادیر ۰ تا ۵ میلی‌متر در ماه رایج است. تنها دو استثنا وجود دارد: نخست نوار ساحلی دریای خزر که به دلیل رطوبت دریا همچنان بارش‌های مستمر را در محدوده ۳۰ تا ۹۰ میلی‌متر در ماه تجربه می‌کند؛ و دوم جنوب شرق کشور (به‌ویژه سیستان و بلوچستان) که در اثر نفوذ بارش‌های موسمی اقیانوس هند در ماه‌های جولای و آگوست بارش‌های پراکنده ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر ثبت می‌کند. فصل پاییز (اکتبر و نوامبر) آغازگر چرخه بارشی جدید است. در اکتبر نخستین امواج سامانه‌های مدیترانه‌ای وارد ایران شده و افزایش بارش در زاگرس و سواحل خزر رخ می‌دهد. در این دوره، بارش در زاگرس بین ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر و در سواحل خزر تا بیش از ۲۵۰ میلی‌متر در ماه می‌رسد. در مقابل، مناطق مرکزی و شرقی کشور هنوز مقادیر اندکی (کمتر از ۲۰ میلی‌متر) دریافت می‌کنند، اما روند افزایشی به‌تدریج مشاهده می‌شود.



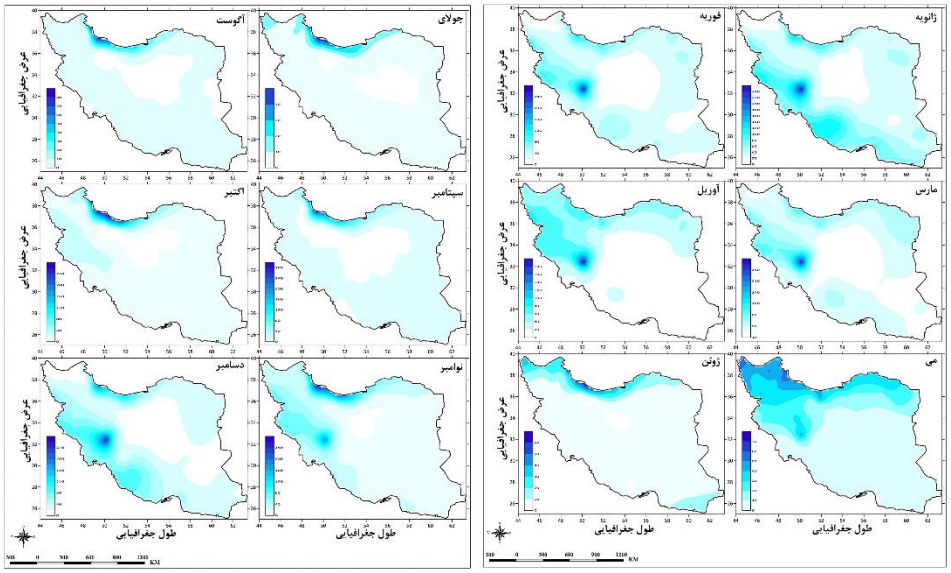
شکل ۷- نقشهٔ میانگین مجموع بارش ماه‌های ژانویه تا دسامبر دوره آماری ۲۰۱۴ – ۱۹۸۵

Fig.7. Map of mean total precipitation from January to December during the 1985–2014

آیندهٔ نزدیک

شکل ۸ میانگین ماهانهٔ بارش پیش‌بینی شده برای دوره ۲۰۴۰- ۲۰۲۱ را بر اساس سناریوی SSP5-8.5 نشان می‌دهد. همان طور که پیشتر نیز اشاره گردید، توزیع بارش کشور ارتباط تنگاتنگی با توزیع ارتفاعات دارد. به‌طوری‌که در بسیاری از نواحی مرتفع مقادیر بارش نسبت به نواحی اطراف بالاتر است. مقادیر افزایش بارش طی ماه های مختلف، متفاوت بوده و در برخی ماه ها کمتر و در برخی ماه ها بیشتر خواهد بود. البته لازم به ذکر است که افزایش دما طی دهه‌های آینده می‌تواند اثر افزایش بارش را خنثی کند.

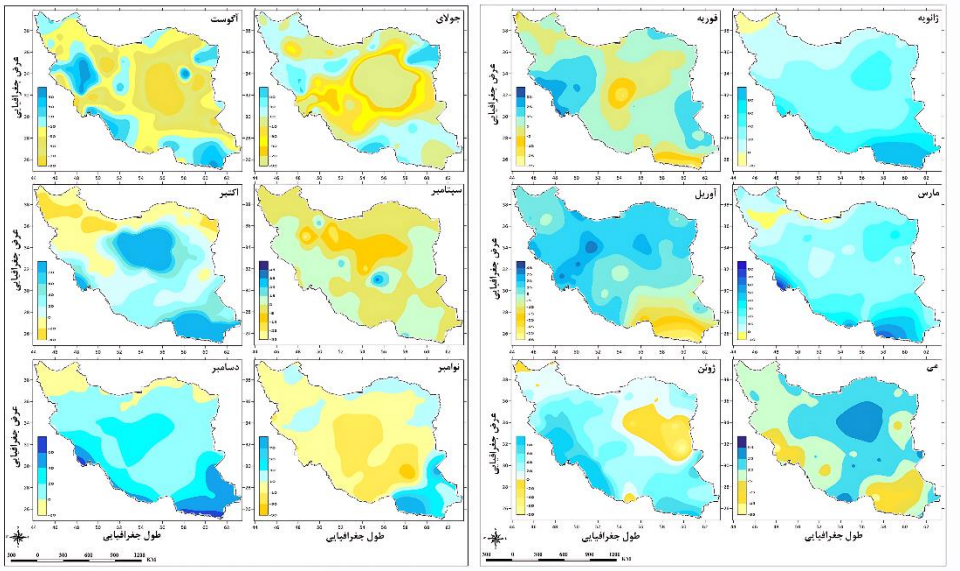
به این صورت که افزایش دما موجب افزایش تبخیر و تعرق شده و از این طریق بارش دریافت شده در نواحی مختلف را از دسترس خارج نماید. در ماه ژانویه از سناریوی SSP5-8.5 دو هسته بارشی بیش از ۲۴۰ میلی متر در زاگرس و نیز جنوب غربی دریای خزر مشاهده می‌شود. این هسته بارشی تا ماه می در کشور قابل مشاهده است. در ماه می، اکثر نواحی شمالی ایران دارای بارش‌های بیش از ۷۰ میلیمتر هستند. از ماه ژوئن تا آگوست کرانه‌های دریای خزر بارشی به طور متوسط برابر ۷۰ میلیمتر دریافت می کند. از ماه سپتامبر تا دسامبر بیشنه بارشی کشور در کرانه‌های دریای خزر با مقدار ۲۶۰ میلی متر می‌باشد.



شکل ۸- نقشهٔ میانگین مجموع بارش ماه‌های ژانویه تا دسامبر دوره آماری ۲۰۴۰ – ۲۰۲۱ بر اساس سناریوی SSP5-8.5

Fig.8. Map of mean total precipitation from January to December during the 2021–2040 based on the SSP5 8.5 scenario

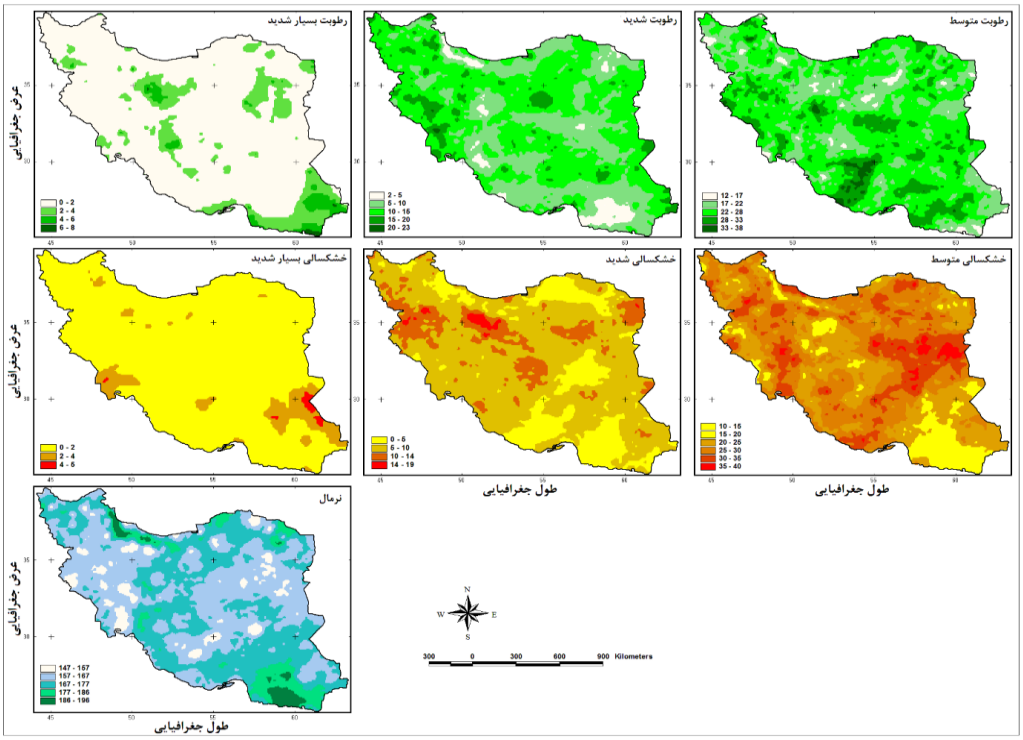
شکل ۹ ناهنجاری بارش دوره آینده نزدیک را نسبت به داده‌های گذشته کشور به درصد و برای سناریوی SSP5-8.5 نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نقاط مختلف کشور ترکیبی از افزایش و کاهش بارندگی در دوره آینده دور پیش‌بینی می‌شود. افزایش بارندگی در شش ماه اول سال میلادی در قسمت‌های جنوبی کشور بیشترین میزان را خواهد داشت. همچنین در برخی از ماه‌ها نواحی غربی کشور نیز افزایش بارندگی قابل توجهی را تجربه خواهند کرد. لازم به ذکر است که در این شش ماه، سطح وسیعی از کشور افزایش بارندگی با درصدهای مختلف را تجربه خواهد کرد. کاهش بارندگی در آینده دور در ماه ژانویه در نواحی شمال غربی کشور مشاهده می‌شود. در ماه فوریه، علاوه بر نواحی شمال غربی، کاهش بارندگی در نواحی مرکزی و جنوب شرقی نیز گزارش شده است. در ماه‌های آوریل و مه، بیشترین کاهش بارندگی در نواحی جنوب شرقی کشور رخ می‌دهد. در ماه ژوئن، بیشترین کاهش بارش در شرق کشور ایران قابل مشاهده است. از ماه جولای تا سپتامبر، اکثر نواحی ایران با کاهش بارش مواجه خواهند بود و تنها بخش‌هایی از نواحی ارتفاعی و کرانه‌های دریای عمان و خلیج فارس افزایش بارش را تجربه می‌کنند. در ماه اکتبر، افزایش بارش عمدتاً در نواحی مرکزی و جنوب شرقی کشور مشاهده می‌شود، و در ماه‌های نوامبر و دسامبر نیز افزایش بارش در جنوب شرقی کشور قابل توجه است.



شکل ۹- درصد ناهنجاری بارش ماه‌های ژانویه تا دسامبر دوره آینده نزدیک بر اساس سناریوی SSP5-8.5

Fig.9. Precipitation persentage Anomalies from January to December in the Near-Future Period Based on the SSP5 8.5 Scenario

شکل ۱۰ فراوانی رخداد هر یک از طبقات شاخص SPEI برای سناریوی SSP5-8.5 را نشان می‌دهد. در رطوبت بسیار شدید نواحی بیشینه همچنان در جنوب شرقی کشور واقع شده‌اند. البته محل قرارگیری بالاترین فراوانی به سمت عرض‌های پایین در ساحل دریای عمان جابه‌جا شده و سطح بسیار کوچکی دارد. در قسمت‌های شرقی و مرکزی کشور نیز فراوانی ۴ – ۲ و ۶ – ۴ ماه به چشم می‌خورد. سطح بزرگی از کشور فراوانی ۲ – ۰ ماه خواهد داشت. ناحیهٔ بیشینه در بوشهر و فارس واقع‌شده است. ۲ هستهٔ بیشینهٔ کوچک نیز در مرکز و شمال غرب کشور به چشم می‌خورد. بالاترین سطح کشور نیز ۲۸ – ۲۲ ماه فراوانی خواهد داشت. بخش وسیعی از کشور در غرب و مرکز و بخش‌هایی از شرق فراوانی ۱۰ – ۵ ماه را تجربه خواهند کرد. نواحی بیشینه، اغلب در نیمهٔ شمالی کشور واقع شده‌اند. نواحی کمینه، نیز در جنوب، جنوب شرق، شمال شرق و قسمتی از ناحیه خزری قرار دارند. در این سناریو در نواحی مرکزی، غربی و شرقی نیز فراوانی‌های کمینه به‌صورت لکه‌های پراکنده دیده می‌شود. فراوانی‌های بیشینه بیشتر در شرق کشور تمرکز دارند. بخش وسیعی از کشور فراوانی ۳۰ – ۲۰ ماه را تجربه خواهد کرد.



شکل ۱۰– فراوانی رخداد انواع وضعیت SPEI طی دوره ۲۰۴۰ – ۲۰۲۱ بر اساس سناریوی SSP5-8.5

Fig.10. Frequency of occurrence of different SPEI conditions during the period of 2021–2040 based on the SSP5-8.5 scenario

بحث

تحلیل خروجی‌های همادی‌شده مدل‌های CMIP6 نشان‌دهندهٔ تغییرات چشمگیر در الگوهای خشکسالی ایران در دهه‌های آینده است. یافته‌های این پژوهش، که تصویری نگران‌کننده از تشدید فراوانی و گسترش مکانی خشکسالی‌های کوتاه‌مدت در ایران تحت سناریوی پرمخاطره SSP5-8.5 ارائه می‌دهد، در راستای اجماع علمی رو به رشد در خصوص آسیب‌پذیری شدید منطقه خاورمیانه در برابر تغییرات اقلیمی قرار دارد (Khosravi & Ouarda, 2025; Abd-Elhamid et al., 2025). با این حال، اهمیت این نتایج نه در تکرار این هشدار کلی، بلکه در تحلیل دقیق مکانیسم‌ها و الگوهای فضایی این پدیده نهفته است؛ به‌طوری‌که شناسایی مناطق جنوبی، شرقی و مرکزی کشور به عنوان کانون‌های اصلی بحران آتی خشکسالی، هم‌سویی قابل توجهی با مطالعاتی دارد که بر افزایش ریسک خشکسالی در این نواحی تأکید کرده‌اند (Shoja, Hamidianpour & Barahooie, 2025; Ghaemi, Hashemi Monfared, Bahrpeyma, Mahmoudi & Zounemat-Kermani, 2024; Khoorani, Balaghi & Mohammadi, 2024). پژوهش حاضر نیز با استفاده از جدیدترین نسل مدل‌های CMIP6، این پیش‌نمایی‌ها را با دقت بیشتری تقویت می‌کند و نشان می‌دهد که مناطق یاد شده نه تنها با خشکسالی‌های شدیدتر، بلکه با تکرار بیشتر آن‌ها مواجه خواهند شد که این امر تاب‌آوری اکوسیستم‌ها و جوامع محلی را به شدت به چالش می‌کشد.

یکی از کلیدی‌ترین یافته‌های مطالعه، تبیین نقش مسلط افزایش دما در شکل‌دهی به بیلان آبی آینده ایران است؛ مطابق نتایج به‌دست آمده حتی در صورت وقوع افزایش جزئی بارش در برخی فصول و مناطق، افزایش شدید دما و به تبع آن تبخیر و تعرق پتانسیل، اثرات مثبت این پارامتر را کاملاً خنثی کرده و منجر به تشدید کمبود رطوبت مؤثر می‌شود. این پدیده، که گاه از آن به عنوان «خشکسالی گرم» (Hot Drought) یاد می‌شود، یک تهدید جدی برای امنیت آبی و غذایی کشور است.

نتیجهٔ مورد بحث، توسط یافته‌های بیات افشاری و همکاران (Bayat-Afshary, Danesh-Yazdi & Shakeri, 2025) پشتیبانی می‌شود که پیش‌بینی کرده‌اند تبخیر و تعرق در بخش کشاورزی ایران می‌تواند تا ۲۳/۸٪ افزایش یابد و حتی راهکارهای مدیریتی مانند کاهش سطح زیر کشت نیز قادر به جبران کامل آن نخواهد بود. این موضوع همچنین اعتبار روش‌شناختی پژوهش حاضر در انتخاب شاخص SPEI را برجسته می‌سازد. همان‌طور که خزائی (Khazaei, 2025) در مطالعه موردی تهران نشان می‌دهد، شاخص‌های مبتنی بر بارش تنها (مانند SPI) در عصر گرمایش جهانی، تصویر گمراه‌کننده‌ای از واقعیت خشکسالی ارائه می‌دهند، زیرا عامل حیاتی تقاضای اتمسفری برای آب را نادیده می‌گیرند.

در مقایسهٔ الگوهای مکانی، نتایج مطالعهٔ حاضر مبنی بر تمرکز خشکسالی در مناطق مرکزی، هم‌خوانی کاملی با پژوهش قائمی و همکاران (Ghaemi et al., 2024) دارد که افزایش هم‌زمان شدت، تداوم و فراوانی خشکسالی را برای حوضهٔ مرکزی ایران پیش‌نگری کرده بودند. با این حال، تحلیل دقیق‌تر تفاوت‌هایی را نیز آشکار می‌سازد؛ برای مثال، مطالعهٔایشان که مبتنی بر مدل‌های CMIP5-CORDEX است، الگوهای متفاوتی را برای جنوب غرب کشور (افزایش شدت اما کاهش تداوم) گزارش می‌دهد. تفاوت‌های ذکر شده می‌تواند ناشی از بهبود فرآیندهای فیزیکی در مدل‌های CMIP6، تفاوت در روش‌های ریزگردانی و یا شاخص خشکسالی مورد استفاده باشد و بر این نکته تأکید دارد که مشخصه‌های مختلف خشکسالی (شدت، تداوم، فراوانی) ممکن است پاسخ‌های غیرخطی و متفاوتی به گرمایش جهانی در مناطق گوناگون بدهند. به طور مشابه، در حالی که پژوهش پیش‌رو یک روند کلی تشدید خشکسالی را نشان می‌دهد، یوسفی و همکاران (Yousefi, Ahani, Moridi & Razavi, 2024) با استفاده از مدل‌های CMIP6، احتمال کاهش شدت خشکسالی در نوار ساحلی خلیج فارس را مطرح می‌کنند که این امر لزوم تحلیل‌های دقیق‌تر در مقیاس‌های محلی و در نظر گرفتن اثرات تعدیل‌کننده پهنه‌های آبی بزرگ را برجسته می‌سازد.

انتخاب سناریوی SSP5-8.5 در این پژوهش، یک تصمیم راهبردی با هدف ارائه یک «آزمون تنش» برای سیستم مدیریت منابع آب کشور بود. نتایج حاصل از این سناریوی بدبینانه، با یافته‌های بیاتاورکشی و همکاران (Bayatavrkeshi et al., 2023) تحت سناریوی پرانتشار قدیمی A2 هم‌خوانی دارد. هر دو مطالعه نشان می‌دهند که در دهه‌های پایانی قرن، فراوانی و شدت خشکسالی به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد. یافتهٔ موردنظر، اهمیت راهبردی تحلیل سناریوهای پرمخاطره را برای سیاست‌گذارانی که مسئول طراحی زیرساخت‌های حیاتی و برنامه‌های بلندمدت امنیت ملی هستند، روشن می‌سازد. در حالی که مطالعاتی مانند احدی و همکاران (Ahadi et al., 2025) نشان می‌دهند که پاسخ سیستم اقلیمی ممکن است در کوتاه‌مدت متفاوت از بلندمدت باشد (برای مثال، کاهش موقت شدت خشکسالی)، نتایج این پژوهش بر این دلالت راهبردی تأکید دارد که سیاست‌گذاری‌های انطباقی باید فراتر از نوسانات کوتاه‌مدت نگریسته و بر مبنای آمادگی برای مواجهه با روندهای حدی پایدار در افق‌های زمانی بلندمدت تدوین شوند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارائه یک تحلیل جامع و پیش‌نمایی از خشکسالی‌های کوتاه‌مدت در گسترهٔ ایران، انجام پذیرفت. نتایج حاصل، چشم‌انداز چالش‌برانگیزی را برای آیندهٔ منابع آب کشور ترسیم می‌کند و پاسخ‌های روشنی به سؤالات محوری این تحقیق ارائه می‌دهد. تحلیل‌ها نشان داد که علی‌رغم تغییرات پیچیده در الگوهای بارش، روند غالب در دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱) به سمت افزایش فراوانی و گسترش دامنه مکانی خشکسالی‌های هواشناسی خواهد بود. این پدیده، عمدتاً ناشی از افزایش شدید دمای هوا و به تبع آن، افزایش تقاضای تبخیری اتمسفر است که هرگونه افزایش احتمالی بارش را بی‌اثر کرده و منجر به بیلان آبی منفی در بخش‌های وسیعی از کشور، به‌ویژه در فصول گرم سال می‌شود. این یافته، بر تحول ماهیت خشکسالی در عصر تغییر اقلیم از یک پدیده، صرفاً ناشی از کمبود بارش به یک بحران ناشی از خشکسالی گرم صحه می‌گذارد.

بر اساس پیش‌نمایی‌های انجام‌شده، توزیع فضایی ریسک خشکسالی در ایران یکنواخت نخواهد بود. مناطق جنوبی، شرقی و مرکزی کشور به‌وضوح به عنوان «کانون‌های داغ» (Hotspots) آسیب‌پذیری شناسایی شدند که در آینده با بیشترین فراوانی رخداد خشکسالی مواجه خواهند شد. این پهنه‌بندی ریسک، یک ابزار راهبردی حیاتی برای سیاست‌گذاران فراهم می‌آورد تا بتوانند منابع محدود مالی و فنی را به صورت هدفمند به مناطقی تخصیص دهند که در خط مقدم مواجهه با بحران آب قرار دارند. یافته‌های این پژوهش، دلالت‌های عمیقی برای مدیریت منابع آب کشور دارد و بر ضرورت یک گذار پارادایمی فوری از رویکردهای سنتی «مدیریت بحران» واکنشی به یک چارچوب جامع «مدیریت ریسک» پیشگیرانه تأکید می‌کند. این چارچوب باید بر سه ستون اصلی استوار باشد: بازنگری اساسی در الگوهای تخصیص و مصرف آب با اولویت‌بخشی به مدیریت تقاضا، تقویت و هوشمندسازی سامانه‌های پایش و هشدار سریع خشکسالی، و سرمایه‌گذاری در راهکارهای افزایش تاب‌آوری اکولوژیکی و اجتماعی. این اقدامات بیانگر گذار ضروری از یک رویکرد واکنشی به یک استراتژی پیشگیرانه و مبتنی بر علم است که یافته‌های این تحقیق، ضرورت انکارناپذیر آن را برای تضمین امنیت آبی پایدار ایران به اثبات می‌رساند.

محدودیت‌های پژوهش و پیشنهادها برای آینده

با وجود ارائه تصویری روشن از آیندهٔ محتمل، لازم است محدودیت‌های این پژوهش نیز مورد توجه قرار گیرد. نخست، تمرکز انحصاری بر سناریوی SSP5-8.5 یک محدودیت کلیدی است. اگرچه این انتخاب برای هدف راهبردی آزمون تنش آگاهانه بود، اما این سناریو تنها یکی از آینده‌های محتمل را به تصویر می‌کشد و از ارائهٔ طیف کاملی از ریسک‌ها باز می‌ماند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، تحلیل مقایسه‌ای با سناریوهای خوش‌بینانه‌تر و بینابین (مانند SSP1-2.6 وSSP2-4.5) انجام شود تا چشم‌انداز جامع‌تری برای برنامه‌ریزی تطبیقی فراهم گردد.

دوم، ایران کشوری با تنوع اقلیمی بسیار بالا است. اعمال یک مجموعه مدل در مقیاس ملی، هر چند برای دستیابی به یک تصویر کلان ضروری است، اما ممکن است پیچیدگی اقلیم‌های محلی را به طور کامل پوشش ندهد. برخی نواحی به دلیل ساختارهای اجتماعی - اقتصادی و اکولوژیکی، حساسیت بیشتری به پیامدهای خشکسالی دارند. لذا، انجام مطالعات ریزمقیاس با استفاده از مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای (RCMs) و واسنجی مدل‌ها بر اساس شرایط هر حوضه آبریز، گام بعدی ضروری در این راستاست.

در نهایت، تحقیق حاضر بر خشکسالی هواشناسی متمرکز بود. درک کامل بحران آب نیازمند تحلیل یکپارچه خشکسالی‌های هیدرولوژیک (جریان رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی) و کشاورزی (رطوبت خاک) و پیوند دادن آن‌ها با شاخص‌های آسیب‌پذیری اجتماعی - اقتصادی است.

راهکارهای مدیریتی

بر اساس یافته‌های پژوهش و با الهام از تجارب جهانی (Kahil, Dinar & Albiac, 2015; Rahman, Jung, Kim & Kwon, 2025)، راهکارهای عملیاتی زیر برای مدیریت ریسک خشکسالی در ایران پیشنهاد می‌شود:

۱- پهنه‌بندی ریسک و تخصیص آب مبتنی بر آن: با استفاده از نقشه‌های کانون‌های بحران تولیدشده در این پژوهش، لازم است یک سیستم تخصیص آب انعطاف‌پذیر و مبتنی بر ریسک طراحی شود. در مناطق پرخطر (جنوب و شرق)، لازم است سیاست‌های سخت‌گیرانه‌تری برای محدودیت کشت محصولات آب‌بر و ترویج الگوهای کشت مقاوم به خشکی اعمال گردد.

۲- گذار از مدیریت عرضه به مدیریت تقاضای آب: یافته‌ها نشان داد که افزایش تبخیر و تعرق، اثر هرگونه افزایش بارش را از بین می‌برد. این بدان معناست که راه‌حل بحران آب در ساخت سازه‌های جدید تأمین آب نیست، بلکه در مدیریت قاطعانه تقاضا، به‌ویژه در بخش کشاورزی است. ارتقای بهره‌وری آبیاری، اجرای برنامه‌های بازچرخانی آب و اصلاح ساختار تعرفه‌های آب از اقدامات کلیدی در این زمینه می‌باشد.

۳- تقویت سامانه‌های هشدار سریع فصلی: با توجه به تشدید خشکسالی در بهار و تابستان، سامانه‌های هشدار سریع باید از پیش‌بینی‌های اقلیمی فصلی برای ارائه هشدارهای به‌موقع به کشاورزان و مدیران سدها استفاده کنند تا امکان اتخاذ تصمیمات پیشگیرانه مانند تغییر تاریخ کشت یا تنظیم خروجی سدها فراهم شود.

۴- سرمایه‌گذاری در منابع آب نامتعارف و حفاظت از آبخوان‌ها: در مناطق خشک و نیمه‌خشکی که آینده‌ای خشک‌تر برای آن‌ها پیش‌بینی می‌شود، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های آب شیرین‌کن (در نوار ساحلی)، تصفیه فاضلاب برای مصارف کشاورزی و صنعتی و طرح‌های تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها برای ذخیره سیلاب‌های زمستانی، یک ضرورت راهبردی برای افزایش تاب‌آوری است (Razavi-Termeh et al., 2024).

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی و سپاسگزاری

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران(INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۳۷۴۱۸ انجام شده است.

References

Abd-Elhamid, H. F., El-Dakak, A. M., Saleh, O. K., Zeleňáková, M., Junakova, N., Alkhalaf, I., ... & Fathy, I. (2025). Assessment of drought risks in arid regions utilizing remote sensing data and the standardized precipitation index in the context of climate change. *Earth Systems and Environment*, 1–20. https://doi.org/10.1007/s41748-025-00678-z

Ahadi, M., Zeynali, B., Salahi, B., Shoja, F., Fazl Kazemi, A., Babaeian, I., & Kohi, M. (2025). Projection of future drought trends in Iran using the CMIP6 multi-model ensemble. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 1-1. [In Persian] https://doi.org/10.22111/jneh.2025.50138.2075

Akinsanola, A. A., Kooperman, G. J., Pendergrass, A. G., Hannah, W. M., & Reed, K. A. (2020). Seasonal representation of extreme precipitation indices over the United States in CMIP6 present-day simulations. *Environmental Research Letters*, *15*(9), 1–12. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb397

Alemu, M. G., Wubneh, M. A., Worku, T. A., Womber, Z. R., & Chanie, K. M. (2023). Comparison of CMIP5 models for drought predictions and trend analysis over Mojo catchment, Awash Basin, Ethiopia. *Scientific African*, *22*, e01891. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01891

Alijani, B. (2011). Spatial analysis of critical daily temperature and precipitation in Iran. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, *11*(20), 1–29. [In Persian] http://jgs.khu.ac.ir/article-1-593-fa.html

Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M. N., Rashid, I. U., Kamil, S., Abid, M. A., ... & Sylla, M. B. (2021). Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. *Earth Systems and Environment*, *5*(2), 155–181. https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6

Ayugi, B., Dike, V., Ngoma, H., Babaousmail, H., Mumo, R., & Ongoma, V. (2021). Future changes in precipitation extremes over East Africa based on CMIP6 models. *Water*, *13*(17), 2358. https://doi.org/10.3390/w13172358

Azizi, Q., Safarrad, T., Mohammadi, H., & Faraji Sabokbar, H. A. (2016). Evaluation and comparison of precipitation reanalysis data for use in Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, *48*(1), 33–49. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2016.57026

Babaeian, I., Rahmatinia, A. E., Entezari, A., Baaghideh, M., Aval, M. B., & Habibi, M. (2021). Future projection of drought vulnerability over northeast provinces of Iran during 2021-2100. *Atmosphere*, *12*(12), 1704. https://doi.org/10.3390/atmos12121704

Bai, H., Xiao, D., Wang, B., Liu, D. L., Feng, P., & Tang, J. (2020). Multi-model ensemble of CMIP6 projections for future extreme climate stress on wheat in the North China Plain. *International Journal of Climatology*, *40*, 21–39. https://doi.org/10.1002/joc.6674

Bayat-Afshary, N., Danesh-Yazdi, M., & Shakeri, F. (2025). Machine learning projections of Iran's water scarcity response to climate-land use synergies. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *61*, 102638. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102638

Bayatavrkeshi, M., Imteaz, M. A., Kisi, O., Farahani, M., Ghabaei, M., Al-Janabi, A. M. S., ... & Yaseen, Z. M. (2023). Drought trends projection under future climate change scenarios for Iran region. *PLoS ONE*, *18*(11), e0290698. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0290698

Behzadi, F., Javadi, S., Yousefi, H., Hashemy Shahdany, S. M., Moridi, A., Neshat, A., ... & Maghsoudi, R. (2024). Projections of meteorological drought severity-duration variations based on CMIP6. *Scientific Reports*, *14*(1), 5027. https://doi.org/10.1038/s41598-024-55340-x

Boucher, O., Servonnat, J., Albright, A. L., Aumont, O., Balkanski, Y., Bastrikov, V., ... & Vuichard, N. (2020). Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *12*(7), e2019MS002010. https://doi.org/10.1029/2019MS002010

Carrao, H., Barbosa, P., & Dos Santos, J. R. (2018). Drought assessment: A global overview. *Global and Planetary Change*, *164*, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.03.012

Chen, Q., Zhao, T., Hua, L., Yu, J., Wang, Y., & Xu, C. (2023). Future drought changes in China projected by the CMIP6 models: Contributions from key factors. *Journal of Meteorological Research*, *37*(4), 454–468. https://doi.org/10.1007/s13351-023-2169-8

Chen, Z., Zhou, T., Zhang, L., Chen, X., Zhang, W., & Jiang, J. (2020). Global land monsoon precipitation changes in CMIP6 projections. *Geophysical Research Letters*, *47*(14), 1–9. https://doi.org/10.1029/2019GL086902

Cook, B. I., Mankin, J. S., Marvel, K., Williams, A. P., Smerdon, J. E., & Anchukaitis, K. J. (2020). Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future*, *8*(6), e2019EF001461. https://doi.org/10.1029/2019EF001461

Elkouk, A., Amiraslani, F., & Ashraf, M. (2022). Drought risk assessment in Sub-Saharan Africa and South Asia: A comparative analysis. *Environmental Science & Policy*, *123*, 58–68. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.09.003

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, *9*(5), 1937–1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016

Farahmand, A., & Agha Kouchak, A. (2015). A standardized approach for drought monitoring. *Earth System Science Data*, *7*(1), 1–9. https://doi.org/10.5194/essd-7-1-2015

Ghaemi, A., Hashemi Monfared, S. A., Bahrpeyma, A., Mahmoudi, P., & Zounemat-Kermani, M. (2024). Spatiotemporal variation of projected drought characteristics in Iran under climate change scenarios using CMIP5-CORDEX product. *Journal of Water and Climate Change*, *15*(3), 1054–1075. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.468

Hamidianpour, M., & Shoja, F. (2022). *An introduction to methods and techniques of climate and climate change modeling*. Zahedan Press. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jtd.2023.380876.2725

Kahil, M. T., Dinar, A., & Albiac, J. (2015). Modeling water scarcity and droughts for policy adaptation to climate change in arid and semiarid regions. *Journal of Hydrology*, *522*, 95–109. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.042

Kamangar, M., Ahmadi, M., Rabiei-Dastjerdi, H., & Hazbavi, Z. (2025). Ensemble modeling of extreme seasonal temperature trends in Iran under socio-economic scenarios. *Natural Hazards*, *121*(2), 1265-1288. https://doi.org/10.1007/s11069-024-06830-8

Kawai, H., Yukimoto, S., Koshiro, T., Oshima, N., Tanaka, T., Yoshimura, H., & Nagasawa, R. (2019). Significant improvement of cloud representation in the global climate model MRI-ESM2. *Geoscientific Model Development*, *12*(7), 2875–2897. https://doi.org/10.5194/gmd-12-2875-2019

Khan, A. J., Koch, M., & Tahir, A. A. (2020). Impacts of climate change on the water availability, seasonality and extremes in the Upper Indus Basin (UIB). *Sustainability*, *12*(4), 1283. https://doi.org/10.3390/su12041283

Khazaei, M. R. (2025). Projected changes to drought characteristics in Tehran under CMIP6 SSP-RCP climate change scenarios. *Heliyon*, *11*(2), e41811. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41811

Khoorani, A., Balaghi, S., & Mohammadi, F. (2024). Projecting drought trends and hot spots across Iran. *Natural Hazards*, *120*(11), 9489–9502. https://doi.org/10.1007/s11069-024-06574-5

Khosravi, Y., & Ouarda, T. B. (2025). Drought risks are projected to increase in the future in central and southern regions of the Middle East. *Communications Earth & Environment*, *6*(1), 384. https://doi.org/10.1038/s43247-025-02359-1

Lanen, H. A. J., Van Lanen, H. A. J., & Heggen, B. J. (2007). Drought and its relationship to climate change. *Global and Planetary Change*, *59*(3–4), 157–168. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.04.003

Li, S. Y., Miao, L. J., Jiang, Z. H., Wang, G. J., Gnyawali, K. R., Zhang, J., ... & Li, C. (2020). Projected drought conditions in Northwest China with CMIP6 models under combined SSPs and RCPs for 2015-2099. *Advances in Climate Change Research*, *11*(3), 210–217. https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.09.003

Li, Z., Liu, T., Huang, Y., Peng, J., & Ling, Y. (2022). Evaluation of the CMIP6 precipitation simulations over global land. *Earth's Future*, *10*(8), e2021EF002500. https://doi.org/10.1029/2021EF002500

Lu, J., Carbone, G. J., & Grego, J. M. (2019). Uncertainty and hotspots in 21st century projections of agricultural drought from CMIP5 models. *Scientific Reports*, *9*(1), 4922. https://doi.org/10.1038/s41598-019-41196-z

Masoudian, A., & Kaviani, M. (2008). *Climatology of Iran*. University of Isfahan Press. [In Persian]

Müller, W. A., Jungclaus, J. H., Mauritsen, T., Baehr, J., Bittner, M., Budich, R., ... & Marotzke, J. (2018). A higher-resolution version of the max planck institute earth system model (MPI-ESM1. 2-HR). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *10*(7), 1383-1413. https://doi.org/10.1029/2017MS001217

Nasrollahi, N., AghaKouchak, A., Cheng, L., Damberg, L., Phillips, T. J., Miao, C., ... & Sorooshian, S. (2015). How well do CMIP5 climate simulations replicate historical trends and patterns of meteorological droughts? *Water Resources Research*, *51*(4), 2847–2864. https://doi.org/10.1002/2014WR016318

O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, *9*, 3461–3482. https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016

Oshima, N., Yukimoto, S., Deushi, M., Koshiro, T., Kawai, H., Tanaka, T. Y., & Yoshida, K. (2020). Global and Arctic effective radiative forcing of anthropogenic gases and aerosols in MRI-ESM2.0. *Progress in Earth and Planetary Science*, *7*(1), 38. https://doi.org/10.1186/s40645-020-00348-w

Rahman, G., Jung, M. K., Kim, T. W., & Kwon, H. H. (2025). Drought impact, vulnerability, risk assessment, management and mitigation under climate change: A comprehensive review. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *29*(1), 100120. https://doi.org/10.1016/j.kscej.2024.100120

Razavi-Termeh, S. V., Sadeghi-Niaraki, A., Farhangi, F., Khiadani, M., Pirasteh, S., & Choi, S. M. (2024). Solving water scarcity challenges in arid regions: a novel approach employing human-based meta-heuristics and machine learning algorithm for groundwater potential mapping. *Chemosphere*, *363*, 142859. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142859

Sellar, A. A., Walton, J., Jones, C. G., Wood, R., Abraham, N. L., Andrejczuk, M., ... & Griffiths, P. T. (2020). Implementation of UK Earth system models for CMIP6. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *12*(4), e2019MS001946. https://doi.org/10.1029/2019MS001946

Sentman, L. T., Dunne, J. P., Stouffer, R. J., Krasting, J. P., Toggweiler, J. R., & Broccoli, A. J. (2018). The mechanistic role of the Central American Seaway in a GFDL Earth System Model. Part 1: Impacts on global ocean mean state and circulation. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, *33*(7), 840–859. https://doi.org/10.1029/2018PA003364

Shoja, F., Hamidianpour, M., & Barahooie, D. (2025). Forecasting climate change effects on drought using the decadal climate prediction project in arid and semi-arid regions of southeastern Iran. *Natural Hazards*, 1–28. https://doi.org/10.1007/s11069-025-07405-x

Silva, L. F. (2003). Drought monitoring using remote sensing and GIS: A case study of Brazil. *Journal of Environmental Management*, *68*(1), 1–12. https://doi.org/10.1016/S0301-4797(02)00080-4

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, *23*(7), 1696–1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

Wang, B., Jin, C., & Liu, J. (2020). Understanding future change of global monsoons projected by CMIP6 models. *Journal of Climate*, *33*(15), 6471–6489. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0993.1

Wehner, M. (2013). Very extreme seasonal precipitation in the NARCCAP ensemble: Model performance and projections. *Climate Dynamics*, *40*(1), 59–80. https://doi.org/10.1007/s00382-012-1393-1

Whipple, W. (1966). Droughts: Their occurrence and effects. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *92*(3), 25–38. https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001450

World Bank Group. (2016). *Climate change and water resources in Iran*. https://www.worldbank.org/en/country/iran/publication/climate-change-water-resources-iran

You, Q., Cai, Z., Wu, F., Jiang, Z., Pepin, N., & Shen, S. S. (2021). Temperature dataset of CMIP6 models over China: evaluation, trend and uncertainty. *Climate Dynamics*, *57*(1), 17–35. https://doi.org/10.1007/s00382-021-05691-2

Yousefi, H., Ahani, A., Moridi, A., & Razavi, S. (2024). The future of droughts in Iran according to CMIP6 projections. *Hydrological Sciences Journal*, *69*(7), 951–970. https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2348720

Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2021). Drought risk management in a changing climate: The role of national policies and the Drought Management Plan (DMP). *Journal of Water and Sustainable Development*, *8*(1), 107–112. [In Persian] https://jwsd.um.ac.ir/article_40281.html

Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., & Kadkhoda, E. (2022). Drought projection in the Urmia Lake basin under SSP Scenarios until the end of the 21st Century. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *53*(7), 1499–1516. [In Persian] https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343700.669278

Zhai, J., Mondal, S. K., Fischer, T., Wang, Y., Su, B., Huang, J., ... Uddin, M. J. (2020). Future drought characteristics through a multi-model ensemble from CMIP6 over South Asia. *Atmospheric Research*, *246*, 105111. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105111

Zhang, Y., & Yao, S. (2012). Drought risk assessment: A new methodology. *Hydrology and Earth System Sciences*, *16*(9), 2803–2811. https://doi.org/10.5194/hess-16-2803-2012

Zhao, T., & Dai, A. (2022). CMIP6 model-projected hydroclimatic and drought changes and their causes in the twenty-first century. *Journal of Climate*, *35*(3), 897–921. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0442.1

Zhou, H., Zheng, Y., & Guo, Z. (2021). Extreme weather events and their impact on water resources: A review. *Water*, *13*(4), 521. https://doi.org/10.3390/w13040521

Zhu, S., Ge, F., Fan, Y., Zhang, L., Sielmann, F., Fraedrich, K., & Zhi, X. (2020). Conspicuous temperature extremes over Southeast Asia: seasonal variations under 1.5 C and 2 C global warming. *Climatic Change*, *160*(3), 343–360. https://doi.org/10.1007/s10584-019-02640-1

Vol. 14, No.4, Winter 2025, p. 153-180 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94245.1589 OPEN ACCESS

Assessment of Urban Flood Risk Mitigation (UFRM) Ecosystem Service with A Short-Term Approach (2 Years), Case Study: Tabriz Metropolitan

Mahdi Herischian [1], Hassan Mahmoudzadeh [2*]

[1] Ph.D. Student in Geography and Urban Planning, Department of Urban and Regional Planning, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

[2*] Professor in Geography and Urban Planning, Department of Urban and Regional Planning, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 22 June 2025

Revised: 16 September 2025

Accepted: 18 September 2025

Available Online: 20 September 2025

Keywords:

Urban flood risk

Ecosystem Service

Flood mitigation

Blue and Green Infrastructure

InVEST Software

Metropolis of Tabriz

ABSTRACT

Urban flooding can lead to inundation and destruction of urban infrastructure, severe human and financial losses, and widespread socio-economic damages. Blue and green infrastructure plays a critical role in mitigating urban flood risk. Therefore, the objective of this study was to evaluate the ecosystem service of urban flood risk mitigation in the Tabriz metropolis under a 2-year return period. In this research, Landsat satellite imagery, land use/land cover data, meteorological data, a biophysical table, GIS techniques, and the InVEST software were employed to assess the ecosystem service of urban flood risk reduction in Tabriz. The results showed that in 1984, under a 2-year return period and a 15-minute rainfall event, the volume of retained and infiltrated water and the economic benefit of the urban flood risk mitigation ecosystem service were 4.28 million m³ and US$10.87 million, respectively; for a 30-minute rainfall event, 3.17 million m³ and US$8.04 million; and for a 45-minute rainfall event, 2.58 million m³ and US$ 6.56 million. In 2002, the corresponding values were 4.37 million m³ and US$ 2.01 million for 15 minutes, 3.21 million m³ and US$14.71 million for 30 minutes, and 2.60 million m³ and US$11.94 million for 45 minutes. In 2022, the retained water volumes and economic benefits were 4.65 million m³ and US$33.25 million for 15 minutes, 6.15 million m³ and US$43.96 million for 30 minutes, and 5.20 million m³ and US$37.14 million for 45 minutes. The findings indicated that, due to the negligible extent of green infrastructure in the Tabriz metropolis, these land uses have played only a limited role in reducing urban flood risk. In the runoff retention and infiltration potential of Tabriz, land use/land cover exerted a greater influence than soil hydrologic groups. Overall, the results demonstrated that the ecosystem service of urban flood risk mitigation in Tabriz has been relatively significant.

* Corresponding author: Hassan Mahmoudzadeh E-mail address: mahmoudzadeh@tabrizu.ac.ir

How to cite this article: Herischian, M., & Mahmoudzadeh, M. (2025). Assessment of Urban Flood Risk Mitigation (UFRM) Ecosystem Service with A Short-Term Approach (2 Years), Case Study: Tabriz Metropolitan. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(4), 153-180. https://doi.org/10.22067/GEOEH.2025.94245.1589

©2025 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

With global climate change and rapid urbanization, urban flooding has become increasingly frequent and severe, causing significant damage worldwide (Tellman et al., 2021). Flood-related disasters are among the most common and destructive natural hazards, leading to a growing proportion of populations at risk of flooding (Rentschler et al., 2023; Tellman et al., 2021). In densely populated urban areas, floods result in substantial human and economic losses, including infrastructure damage, reduced agricultural productivity, disrupted communication systems, and risks to human health and safety (Alderman et al., 2012; Peng & Zhang, 2022; Pham et al., 2021). Mitigating urban flooding is a critical component of urban planning and disaster risk reduction strategies. Traditional mitigation measures, often referred to as gray infrastructure, include urban drainage systems and flood pumping stations, which have been widely implemented to manage runoff and reduce flood-related impacts (Prudencio & Null, 2018; Qi et al., 2021; Zischg et al., 2017). However, these measures often require substantial financial investment and have limited effectiveness (Sohn et al., 2019). In contrast, green infrastructure solutions—such as green roofs, rain gardens, permeable pavements, urban green spaces, and urban forests—play a vital role in regulating stormwater runoff through ecosystem services (Ahiablame & Shakya, 2016; Qin et al., 2013).

These measures are environmentally sustainable, require minimal energy input, and are often cost-effective. In the metropolitan area of Tabriz, located in the Urmia Lake Basin, the city's topographic position on a plain and the presence of two major rivers, the Ajichay and Quri, have historically contributed to devastating floods. Rapid urban expansion, particularly following the Islamic Revolution, coupled with widespread migration and unplanned development, has exacerbated flood risks in Tabriz (Yazdani et al., 2018). Therefore, this study aims to evaluate the ecosystem services provided by green infrastructure in mitigating urban flood risk in the Tabriz metropolitan area.

Material and Methods

This study employs a descriptive-analytical methodology with a developmental-applicative focus. Data were collected from library resources, documentary records, electronic sources, surveys, and field observations. The research utilizes the urban flood risk mitigation model from the InVEST 3.12.0 software package. This model assesses urban flood risk mitigation based on inputs including a vector map of the study area (watershed), rainfall data (in millimeters), a land use/land cover map, a soil hydrological group raster map, a biophysical table, a vector map of built infrastructure, and a table estimating damages from urban flooding. The model generates the following outputs:

1. Runoff volume, presented as raster data.
2. Runoff absorption and retention (in millimeters), expressed as a percentage of rainfall in a raster file.
3. Runoff retention volume (in m^3), depicted in a raster file.
4. Flood risk, summarized in a descriptive table and represented through vector and raster data, enabling identification of spatial variations within defined local boundaries.
5. Monetary assessment of flood-related damages.
6. Monetary valuation of the ecosystem service of urban flood risk mitigation, calculated using the avoided damage cost method and presented in a descriptive table.

Results and Discussion

Across the three study periods (1984, 2002, and 2022), the soil in most of the ten districts of the Tabriz metropolitan area, except for parts of Districts 4, 6, and 7 and minor portions of other districts, was predominantly loam and clay. These soil types exhibit moderate to high runoff potential, meaning that a significant portion of rainfall runoff flows over the surface rather than infiltrating the soil. Consequently, most districts in Tabriz are at elevated risk of urban flooding due to their high runoff potential.

The continuous urbanization, significant land-use changes, and increased construction and urban density in Tabriz over recent decades have resulted in a substantial increase in impervious surfaces. These surfaces, particularly those associated with high-density residential areas, have consistently contributed to the highest runoff volumes across all three periods. Green infrastructure, including green spaces, agricultural lands, and pastures, has played a more significant role in mitigating urban flood risk than water infrastructure in all three periods, with the exception of one instance (a 15-minute rainfall event in 2002).

An examination of the land use/land cover (LULC) in Tabriz city indicates that impervious surfaces increased continuously from 1984 to 2002, whereas a slight decrease was observed in 2022. Specifically, residential land use increased by approximately 16.54% from 1984 to 2002, followed by a decrease of about 0.50% from 2002 to 2022. This expansion of impervious surfaces has reduced the capacity of most districts in the Tabriz metropolitan area to absorb and retain runoff, thereby increasing the risk of urban flooding. Continued growth of impervious areas in the future could further exacerbate flooding, potentially inundating urban infrastructure, increasing economic losses, and threatening the stability of the city.

The findings reveal that in 1984, for a 2-year return period rainfall event, the volume of water absorbed and retained, along with the associated ecosystem service benefits for mitigating urban flood risk, were as follows: for a 15-minute rainfall, 4.28 million m^3 valued at US$10.87 million; for a 30-minute rainfall, 3.17 million m^3 valued at US$8.04 million; and for a 45-minute rainfall, 2.58 million m^3 valued at US$6.56 million. In 2002, the corresponding values were: for a 15-minute rainfall, 4.37 million m^3 valued at US$2.01 million; for a 30-minute rainfall, 3.21 million m^3 valued at US$14.71 million; and for a 45-minute rainfall, 2.60 million m^3 valued at US$11.94 million. In 2022, the values were: for a 15-minute rainfall, 4.65 million m^3 valued at US$33.25 million; for a 30-minute rainfall, 6.15 million m^3 valued at US$43.96 million; and for a 45-minute rainfall, 5.20 million m^3 valued at US$37.14 million.

Conclusion

The results showed that in the metropolitan of Tabriz, due to the insignificance of green infrastructure, these land uses have not played a significant role in reducing urban flood risk. In the potential for absorption and retention of runoff, land use/land cover has played a more significant role compared to the hydrological soil group. Furthermore, the results suggest that ecosystem services have played a relatively significant role in mitigating urban flood risk in Tabriz.

جلد ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴ ، ص ۱۸۰-۱۵۳ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94245.1589 دسترسی آزاد

ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش خطر سیلاب شهری (UFRM) با رویکرد دورهٔ کوتاه مدت (۲ ساله)، مطالعهٔ موردی: کلان‌شهر تبریز

مهدی هریسچیان[۱]، حسن محمودزاده[۲]*

[۱]دانشجوی دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، گروه برنامه‌ریزی شهری و منطقه ای، دانشکدهٔ برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

[۲]استاد جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، گروه برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، دانشکدهٔ برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷

کلمات کلیدی:

ریسک سیلاب شهری

خدمت اکوسیستمی

کاهش ریسک سیلاب

زیرساخت‌های آبی و سبز

نرم افزار InVEST

کلان‌شهر تبریز

چکیده

وقوع سیلاب شهری می‌تواند باعث به زیر آب رفتن و از بین رفتن زیرساخت‌های شهری، تلفات جانی و مالی شدید و خسارات گستردهٔ اقتصادی و اجتماعی ناشی از آن شود. در این بین زیرساخت‌های آبی و سبز شهری نقش مؤثری در کاهش ریسک سیلاب شهری ایفاء می‌کنند. از این رو هدف این پژوهش ارزیابی نقش خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری کلان‌شهر تبریز با دورهٔ بازگشت ۲ ساله می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای لندست، کاربری اراضی/ پوشش اراضی، هواشناسی، جدول بیوفیزیکی، GIS و نرم افزار InVEST به ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری تبریز پرداخته شده است. یافته‌ها نشان داد که در سال ۱۳۶۳ با دورهٔ بازگشت ۲ ساله و در طی بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای، حجم آب جذب و نگهداشته شده و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری به ترتیب ۴/۲۸ میلیون متر مکعب، ۱۰/۸۷ میلیون دلار، با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای ۳/۱۷ میلیون متر مکعب و ۸/۰۴ میلیون دلار و با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای ۲/۵۸ میلیون متر مکعب و ۶/۵۶ میلیون دلار، در سال ۱۳۸۱ با بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای ۴/۳۷ میلیون متر مکعب و ۲/۰۱ میلیون دلار، با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای ۳/۲۱ میلیون متر مکعب ۱۴/۷۱ میلیون دلار و با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای ۲/۶۰ میلیون متر مکعب و ۱۱/۹۴ میلیون دلار و در سال ۱۴۰۱ با بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای ۴/۶۵ میلیون متر مکعب و ۳۳/۲۵ میلیون دلار، با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای ۶/۱۵ میلیون متر مکعب و ۴۳/۹۶ میلیون دلار و با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای، ۵/۲۰ میلیون متر مکعب و ۳۷/۱۴ میلیون دلار برای تبریز بوده است. نتایج نشان داد که در کلان شهر تبریز به دلیل ناچیز بودن زیرساخت‌های سبز، این کاربری‌ها نقش چندانی در کاهش ریسک سیلاب شهری نداشته‌اند. در پتانسیل جذب و نگهداشت رواناب تبریز، کاربری اراضی/ پوشش اراضی در مقایسه با گروه هیدرولوژیکی خاک نقش بیشتری را داشته است. همچنین نتایج نشان داد که نقش خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری تبریز نسبتاً چشمگیر بوده است.

* نویسندهٔ مسئول: حسن محمودزاده E-mail: mahmoudzadeh@tabrizu.ac.ir

مقدمه

با تغییرات اقلیمی جهانی و شهرنشینی سریع، سیلاب شهری به طور مداوم افزایش پیدا کرده و باعث بروز آسیب‌های شدید در سرتاسر جهان شده است (Tellman et al., 2021). بلایای مرتبط با سیل به یکی از شایع‌ترین و مخرب‌ترین مخاطرات در سرتاسر جهان تبدیل شده که در نتیجهٔ آن نسبت جمعیت در معرض خطر سیل به طور مداوم افزایش پیدا می‌کند (Rentschler et al., 2023; Tellman et al., 2021). در مناطق شهری پرجمعیت و متراکم، سیل منجر به خسارات انسانی و اقتصادی عمده‌ای مانند آسیب به زیرساخت‌ها، کاهش بازده محصولات کشاورزی، وقفه‌های ارتباطی (Pham et al., 2021)، و ریسک‌های انسانی (Alderman, Turner & Tong, 2012) می‌شود (Peng & Zhang, 2022). چنان چه طی ماه‌های مارس تا آوریل ۲۰۲۴، چندین ایالت روسیه دچار سیل شدید شدند که در نتیجهٔ آن بیش از ۱۰۰،۰۰۰ نفر آواره و نزدیک به ۱۸۰۰۰ واحد مسکونی دچار آب گرفتگی شد. در ماه مه سال ۲۰۲۳، منطقه شمال مرکزی ایتالیا به دلیل بارندگی‌های شدید متوالی، سیل شدیدی را تجربه کرد که منجر به کشته شدن ۱۵ نفر، آب گرفتگی بیش از ۴۰ شهر و خسارات اقتصادی مستقیمی شد که تخمین زده می‌شود میزان این خسارت‌ها در حد میلیاردها یورو باشد. چین بیشترین میزان آسیب‌ها را در بین کشورهای جهان از نظر بلایای طبیعی به ویژه سیل به خود اختصاص داده است (UN Office for Disaster Risk Reduction, 2020). از ۲۹ ژوئیه تا ۲ آگوست ۲۰۲۳، پکن تحت تأثیر بارش رگباری شدید قرار گرفت که نزدیک به ۱/۲۹ میلیون نفر را تحت تأثیر مستقیم قرار داد و ۵۹۰۰۰ منزل مسکونی نیز دچار فروریختگی شد. طبق آمار، از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲، به طور متوسط ۷۴،۹۶۸،۴۰۰ نفر در چین سالانه تحت تأثیر سیل قرار می‌گیرند که خسارت مستقیم اقتصادی آن به طور متوسط ۲۲۵،۳۵۵ میلیون یوان در سال است. این امر بیانگر آن است که سیل شهری موجب بروز خسارات و تلفات اقتصادی زیادی می‌شود که در نتیجهٔ آن توسعهٔ پایدار انسانی، اقتصادی و اجتماعی مورد تهدید جدی قرار می‌گیرد (Rözer et al., 2022; Rufat & Botzen, 2022). با این وجود، به دلیل افزایش فراوانی رخدادهای شدید اقلیمی و سیستم‌های زهکشی نسبتاً قدیمی در مقایسه با توسعهٔ سریع شهری، سیلاب شهری به طور مکرر رخ می‌دهد که به طور مستقیم بر حمل و نقل روزانه مردم تأثیر گذاشته و زندگی و سلامتی آنها را به خطر می‌اندازد (Ekmekcioğlu, Koc & Özger, 2021).

اقدامات مرتبط با کاهش سیلاب شهری جزء مهم‌ترین استراتژی‌های تصمیم‌گیری جهت پیشگیری و کاهش سیلاب شهری است. این اقدامات را می‌توان به دو نوع طبقه‌بندی کرد: اقدامات خاکستری و اقدامات سبز (Qi et al., 2021). اقدامات سنتی کاهشی شامل اقدامات خاکستری، از قبیل سیستم شبکه زهکشی شهری و ایستگاه پمپاژ سیل، به طور گسترده‌ای در مناطق شهری برای جابه‌جایی سریع رواناب رگباری و کاهش بلایای ناشی از سیل مورد استفاده قرار گرفته است (Prudencio & Null, 2018; Zischg et al., 2017) که در نتیجهٔ آن مدیران شهری اغلب بر اقدامات کاهشی خاکستری مانند بهبود سیستم زهکشی شهری جهت کاهش وقوع و پیامدهای ناشی از سیلاب شهری تکیه می‌کنند. با این حال، اثربخشی این اقدامات چندان مطلوب نیست و به سرمایه‌گذاری‌های اقتصادی گسترده‌ای نیاز دارد (Sohn, Kim, Li & Brown, 2019) . از این رو، استراتژی‌های مدیریتی پایدار رواناب رگباری مبتنی بر طبیعت، مانند رویکردهای بهینه مدیریت در ایالات متحده، سیستم‌های زهکشی پایدار شهری در بریتانیا، و شهر اسفنجی در چین، در سال‌های اخیر رواج زیادی پیدا کرده است (Ma et al., 2019; Kuller, Farrelly, Deletic & Bach, 2018; Fletcher et al., 2015). این رویکردهای سازگار با محیط زیست، استفاده از منابع آب را بهبود بخشیده و باعث افزایش رضایت ساکنان از محیط زندگی‌شان می‌شود. اقدامات کاهشی سبز، مانند بام‌های سبز، باغ‌های بارانی، و روسازی‌های نفوذپذیر، فضاهای سبز شهری، جنگل‌های شهری و در کل زیرساخت‌های سبز شهری نقش مهمی در تنظیم رواناب رگباری از طریق خدمات زیست محیطی ایفا می‌کنند (Ahiablame & Shakya, 2016; Qin, Li & Fu, 2013). اقدامات کاهشی سبز از طریق طراحی اکولوژیکی منظر و فناوری مهندسی برای مقابله با مسائل مختلف آب شهری، مانند مدیریت ریسک سیل، به اجرا گذاشته می‌شود (Liang, You & Lee, 2019; Zeng, Guo & Dong, 2019; Kuller et al., 2018; Pyke et al., 2011). این نوع از اقدامات دارای

اهمیت بسیاری هستند، زیرا به حداقل انرژی ورودی نیاز دارند و اغلب از لحاظ زیست محیطی مقرون به صرفه هستند. با این حال، محققان دریافته‌اند که اتکاء صرف به اقدامات کاهشی سبز با وجود این که مزایای زیست محیطی آن قابل توجه است به دلیل این که ظرفیت آنها در کاهش حجم سیل با افزایش مدت زمان بارندگی و دوره بازگشت کاهش می‌یابد، ممکن است همیشه بهترین راه حل نباشد (Hou et al., 2020). این مورد ناشی از ظرفیت محدود ذخیره سازی آن‌ها است که می‌تواند قبل از شروع اوج بارندگی اشباع شود (Sohn et al., 2019; Ahiablame & Shakya, 2016).

قرار گرفتن کلان‌شهر تبریز در حوضهٔ آبریز دریاچهٔ ارومیه، موقعیت دشتی آن و عبور دو رودخانهٔ اصلی آجی چای و قوری چای از بافت شهر باعث شده که در طول تاریخ بارها سیلاب‌های ویرانگر در آن رخ داده و ویرانی‌های زیادی بر جای بگذارد. علاوه بر دو رود اصلی که طول شهر را طی می‌کنند، مسیل‌های فراوانی نیز در عرض شهر وجود دارد که از ارتفاعات شمالی و جنوبی شهر شروع و در بافت میانی به دو رود اصلی شهر می‌پیوندند. توسعهٔ روزافزون شهر به خصوص پس از انقلاب اسلامی که با مهاجرت‌های گسترده و توسعهٔ کالبدی یک بارهٔ شهر همراه بود، موجب شده شهر تبریز روی یک پهنهٔ وسیع سیلابی گسترده شود. از طرفی اکثر این توسعه‌ها یا کاملاً بی‌برنامه و بی‌ضابطه مانند بافت اسکان غیر رسمی رخ داده است، یا غیر کارشناسی مانند توسعهٔ محور شرقی شهر بوده است که در هر دو صورت عدم رعایت حریم مسیل‌ها و رودخانه‌های فصلی و دائمی منجر به بروز بحران‌های شدید و بروز سیلاب‌های متعدد برای شهر تبریز شده که این بحران‌ها هر ساله خسارات شدیدی را به همراه داشته است (Yazdani, Ghasemi & Saleki Maleki, 2018). در پژوهشی که محمودزاده و همکاران (MahmoodZadeh, Emami Kia & Rasooli, 2015) در مورد ریز پهنه‌بندی خطر سیل در محدودهٔ شهر تبریز انجام داده‌اند بیان کرده‌اند که طبق نقشه، ارزیابی خسارات، بیشترین خسارات مربوط به مناطقی است که از بافت فرسوده، مصالح غیر استاندارد و نامقاوم برخوردارند. این مناطق اگر چه از تراکم مسکونی کمی برخوردارند و رشد عمودی چندانی ندارند؛ اما تراکم جمعیت در آن‌ها بیشتر از مناطق نوساز شهر است. با توجه به ضرورت‌های ذکر شده در بالا و تأثیری که خدمات اکوسیستمی در کاهش خطر سیلاب شهری دارد، هدف این پژوهش ارزیابی نقش خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری کلان‌شهر تبریز است.

در زمینهٔ خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری در عرصه‌های داخلی و خارجی پژوهش‌های متعددی انجام شده که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود. در عرصه داخلی فتوحی و کیانی (Fotouhi & Kiani, 2015) در طی پژوهشی ریز پهنه‌بندی ریسک سیلاب شهری شهر نهاوند را با استفاده از مدل AHP و GIS انجام داده و به این نتیجه رسیدند که از وسعت ۸۶۱ هکتاری شهر نهاوند ۴۰/۲ درصد از محدوده دارای وضعیت با ریسک کم تا بسیار کم، ۳۱/۵ درصد دارای وضعیت با ریسک متوسط و ۲۸/۱ درصد از محدودهٔ مورد مطالعه نیز در شرایط با ریسک بالا تا بسیار بالا قرار دارد. احمدی و همکاران (Ahmadi, Bazrafshan, Salajeghe, Holisaz & Azare, 2021) ریسک و آسیب‌پذیری سیلاب شهری بندرعباس را با استفاده از مدل یادگیری ماشینی بیشینهٔ بی‌نظمی (MaxEnt) و ماشین بردار پشتیبان (SVM)، تحلیل سلسله مراتبی AHP و GIS انجام داده و به این نتیجه رسیدند که در ریسک و آسیب‌پذیری سیلاب شهری بندرعباس عامل تراکم جمعیت دارای بیشترین اهمیت است. قدبیگی و همکاران (Ghadbeygi, Mazaheri, Shafiei & Mardian, 2024) مدیریت ریسک سیلاب شهری شهر اراک را با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP، مدل TOPSIS و GIS انجام دادند. نتایج نشان داد که حدود ۷۷۷ هکتار از مساحت شهر که ۶/۶۳ درصد را شامل می‌شود و عمدتاً مرکز شهر و پیرامون رودخانه کرهرود را در بر می‌گیرد، دارای پتانسیل ریسک بالای سیلاب است. در این مناطق که پتاسیل ریسک سیلاب شهر اراک بالاتر است، عمدتاً شیب کمتر، فاصله تا رودخانه و مسیل‌ها کمتر و تراکم جمعیت بالاتر می‌باشد.

در عرصه خارجی نیز گو و لیو (Gu & Liu, 2024) پیش‌بینی خطر سیل را برای شهر هنگ کنگ با استفاده از مدل تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) انجام داده و به این نتیجه رسیدند که با برنامه‌ریزی ثالث (TPU[1])، شاخص خطر سیل (FRI[2]) سالانه افزایش می‌یابد که در نتیجه آن بیشترین تهدیدات متوجه مناطق با تراکم حمل‌ونقلی و امکانات عملکردی بالا خواهد بود. علاوه بر این، شاخص خطر سیل بر مجموعه برنامه‌ریزی ثالث ساحلی آتی در غرب هنگ کنگ تأثیر زیادی خواهد گذاشت و در نتیجه بیشترین تأثیرات منفی آن متوجه مناطق دارای ساختمان های با تراکم بالا خواهد بود. وو و همکاران (Wu at al., 2024) تأثیرات مقیاس فضایی عناصر شهری بر سیلاب شهری را با استفاده از رگرسیون وزن دار جغرافیایی چند مقیاسی (MGWR) انجام دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که دورهٔ بازگشت بارش‌های شدید، تراکم جمعیت و نیروی انسانی ورودی از جمله مؤثرترین عوامل بر سیلاب شهری بوده است. شیب، فاصله از رودخانه و نسبت مساحت جاده‌ای کمترین تأثیر را بر سیلاب شهری داشتند. دای و همکاران (Dai, Cheng, Shen, Geng & Zhang, 2024) ظرفیت کاهش خطر سیل‌های آتی در شهرهای بزرگ چین را با استفاده از مدل شبیه‌سازی محیط‌های شهری – منطقه‌ای آینده (SSP[3]) انجام داده و به این نتیجه رسیدند که ۱) پیش‌بینی می‌شود اندازه شهرهای بزرگ تا سال ۲۰۵۰، ۳۰ درصد افزایش یابد و شمال و شرق چین جزء قطب های اصلی رشد شهری باشند. ۲) شدت بارش در شهرهای بزرگ در SSP126 (در سناریوهای با روندهای یکسان اجتماعی - اقتصادی)، ۰/۴ درصد افزایش یابد، اما در سناریوهای SSP245 و SSP585، شدت بارش به ترتیب ۵/۴ درصد و ۲/۳ درصد کاهش یابد. (۳) ظرفیت کاهش خطر سیل شهرهای بزرگ در سناریوی SSP126، ۲/۷ درصد و در سناریوی SSP585، ۲/۱ درصد کاهش یابد، اما در سناریوی SSP245، ۰/۲ درصد افزایش یابد. بیشتر شهرهای با ظرفیت کم در شمال و شرق چین واقع شده‌اند. وانگ و همکاران (Wang, Peng, Yang, Wang & Deng, 2024) بررسی تأثیرات نسبتی مدیریت زیرساخت های طبقه بندی شده بر کاهش خطر سیلاب شهری شهر پکن را با استفاده از رگرسیون لجستیک انجام دادند. نتایج نشان داد که زیرساخت‌های سبز نقش مؤثرتری در کاهش مخاطرات مرتبط با سیل در بیشتر مناطق شهری پکن دارد تا زیرساخت‌های آبی، در حالی که زیرساخت‌های خاکستری خطر سیل را به ویژه در حومه‌های شمال شرقی افزایش می‌دهد. نوآوری این پژوهش عبارت است از:

استفاده از مدل InVEST: این پژوهش نخستین مطالعهٔ داخلی است که از مدل UFRM بسته نرم‌افزاری InVEST 3.12.0 برای ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری استفاده کرده است. پژوهش‌های داخلی قبلی عمدتاً بر مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند AHP، TOPSIS، GIS و مدل‌های یادگیری ماشینی (مانند MaxEnt و SVM) مبتنی بوده‌اند و به ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری با این مدل نپرداخته‌اند.

تمرکز بر مقیاس شهری و محلی: برخلاف مطالعات قبلی که ریسک سیلاب شهری را در مقیاس کلی یا بدون تمرکز بر خدمات اکوسیستمی مورد بررسی قرار داده‌اند، این پژوهش خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری را در سطح مناطق دهگانه کلان‌شهر تبریز (با استفاده از تحلیل فضایی و زمانی) مورد ارزیابی قرار داده که این رویکرد در هیچ پژوهش داخلی یا خارجی در مورد تبریز انجام نشده است.

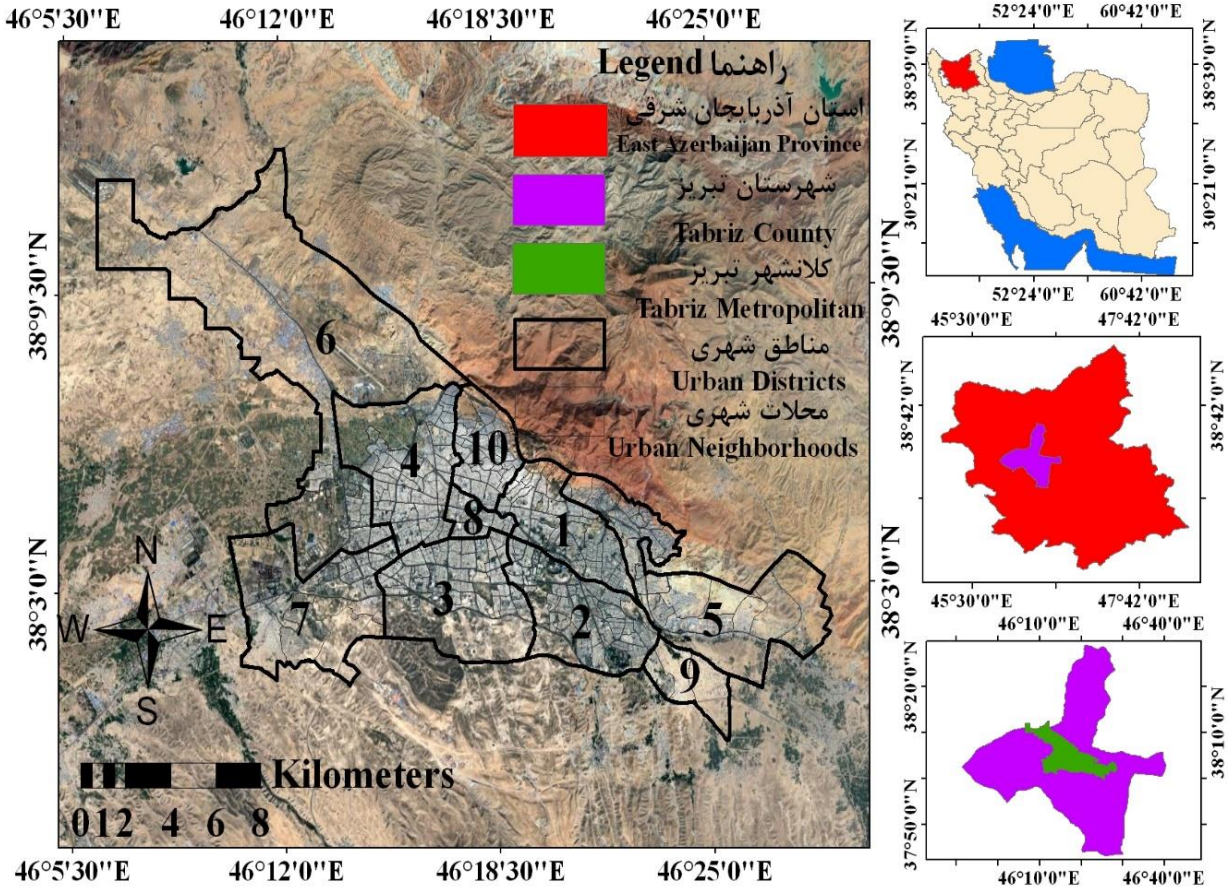
استفاده از تحلیل زمانی و برای سه دوره: بررسی تغییرات خدمات اکوسیستمی UFRM در سه دوره زمانی ۱۹۸۴، ۲۰۰۲ و ۲۰۲۲، با در نظر گرفتن تغییرات کاربری اراضی/پوشش اراضی، گروه هیدرولوژیکی خاک و شدت بارندگی، نوآوری دیگری است که به درک روند تاریخی و آینده ریسک سیلاب کمک می‌کند. مطالعات خارجی (مانند مطالعاتی که با استفاده از مدل های PCA، MGWR، SSP و رگرسیون لجستیک انجام شده) اغلب بر پیش‌بینی آینده با استفاده از عوامل خاص تمرکز دارند، اما نه در مقیاس زمانی و محلی انجام شده در این پژوهش و برای یک کلان‌شهر مانند تبریز.

1-Tertiary Planning Units
2-Flood Risk Index
3- Shared Socioeconomic Pathways Scenarios (SSP)

ارزیابی اقتصادی با روش هزینه خسارت اجتناب‌شده: محاسبه ارزش پولی خدمات اکوسیستمی (به دلار) بر اساس حجم جذب و نگهداشت رواناب، و مقایسه نقش زیرساخت‌های سبز (مانند فضای سبز و اراضی کشاورزی) با زیرساخت‌های آبی و خاکستری، جنبه‌ای نوین است که به سیاست‌گذاری پایدار شهری کمک می‌کند. در مجموع، این مقاله خلأ موجود در ادبیات را پر کرده و رویکردی یکپارچه برای مدیریت ریسک سیلاب در کلان‌شهرهای ایرانی ارائه می‌دهد که می‌تواند الگویی برای مطالعات مشابه باشد.

منطقهٔ مورد مطالعه

کلان‌شهر تبریز در گوشه شمال غربی کشور و در امتداد محور بین المللی تهران - بازرگان که ایران را به اروپا متصل می‌سازد قرار گرفته است. کلان‌شهر تبریز با وسعتی حدود ۱۱۸۰۰ کیلومتر در ۴۶ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۲ دقیقه عرض شمالی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است. متوسط ارتفاع شهر حدود ۱۳۴۰ متر از سطح دریاهای آزاد برآورد گردیده است (Zeynali Azim, Hatami Golzari, Karami & Babazadeh Oskoui, 2021). رودخانه آجی چای (تلخه رود) از قسمت شمال و شمال غرب تبریز می‌گذرد و بعد از طی مسافتی قابل توجه در دشت تبریز به دریاچه ارومیه می‌ریزد و مهران رود نیز از میانه تبریز می‌گذرد (https://www.tabriz.ir). بر پایهٔ آخرین تقسیمات اداری، کلان‌شهر تبریز از ۱۰ منطقهٔ شهرداری تشکیل شده است (شکل ۱). بزرگ‌ترین آن از لحاظ وسعت، منطقه ۶ و کوچک‌ترین آن، منطقهٔ ۸ می‌باشد. از لحاظ جمعیتی نیز، منطقهٔ ۴ بیشترین جمعیت و منطقهٔ ۹، کمترین جمعیت را دارد (Tabeyi, Babaee Aghdam & Hakimi, 2022).



شکل ۱- نقشهٔ محدودهٔ مورد مطالعه

Fig. 1. Map of the study area

مواد و روش‌ها

داده‌ها

در این پژوهش از مدل کاهش ریسک سیلاب شهری از مجموعه بسته‌های نرم‌افزاری InVEST 3.12.0 استفاده شده است. برای تهیهٔ هر یک از داده‌های مورد نیاز مدل طبق روش زیر عمل شد:

نقشهٔ محدودهٔ مورد مطالعه/ نقشه حوضه آبریز محدوده مورد مطالعه

منظور از این نقشه، نقشه مناطقی است که نتایج نهایی باید بر روی آن‌ها اعمال شود. این نقشه باید در قالب وکتوری یا شیپ فایل وارد نرم افزار InVEST شود (www.xiaoganghe.github.io). این نقشه می تواند شامل محدودهٔ مورد مطالعه یا حوضهٔ آبریز محدودهٔ مورد مطالعه نیز باشد. در این پژوهش نقشهٔ محدودهٔ کلان‌شهر تبریز وارد نرم افزار InVEST گردید.

میزان بارش (برحسب میلیمتر)

استفاده از شدت بارندگی یکی از مهمترین شاخص‌هایی است که برای مدل خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ضروری است. شدت بارندگی رابطهٔ مستقیمی با خطر سیل دارد. شدت بارندگی در یک منطقهٔ خاص به میزان و زمان بارندگی بستگی دارد (Bose & Mazumdar, 2023). منظور از این مورد، میزان بارش با در نظر گرفتن رخدادهای با دوره‌های بازگشت مخصوصاً دوره‌های بازگشت طولانی است که به صورت میلیمتر در نرم افزار InVEST وارد شده و در تمامی پیکسل‌ها به صورت یکسان اعمال می‌شود (www.xiaoganghe.github.io). این میزان برای سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ کلان‌شهر تبریز با دورهٔ بازگشت ۲ ساله و برای بارندگی‌های ۱۵ دقیقه‌ای، ۲۱/۹۳، ۳۰ دقیقه‌ای، ۱۴/۰۷ و ۴۵ دقیقه‌ای، ۱۰/۷۸ میلیمتر وارد نرم افزار InVEST گردید. در این پژوهش، داده‌های مربوط به بارش از طریق ایستگاه سینوپتیک[1] تبریز به دست آمده و برای محاسبهٔ دورهٔ بازگشت از رابطه شدت - مدت - فراوانی که توسط بل[2] به وجود آمده و به وسیله قهرمان و آبخضر (Ghahraman & Abkhezr, 2004) در ایران ارتقاء داده شده استفاده شد:

طبق روابط (۹) و (۸)، R_t^T شدت بارندگی در مدت و دورهٔ بازگشت مورد نظر، R_{60}^{10} شدت بارش یک ساعته با دوره بازگشت ۱۰ سال (در این پژوهش شدت بارش برای بارندگی‌های با مدت زمان‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه به صورت جداگانه و با دوره بازگشت ۲ ساله محاسبه شد)، R_{1440}^2 میانگین حداکثر باران روزانه، t دوره زمانی مورد نظر، T دوره بازگشت و A، B، a_1، a_2 و a_3 ضرایب ثابت رابطه که بسته به مدت تداوم بارش مقادیر آن متفاوت هست (Farahnakian, Ghazavi, Dokhan & Omidvar, 2024) (جدول‌های ۴ و ۱).

جدول ۱- ضرایب ثابت رابطه قهرمان – آبخضر

Table 1- Fixed coefficients of the Ghahraman-Abkhezr Equation (Farahnakian et al., 2024)

مدت تداوم باران (ساعت)	1 >=	2 >=	9 <=	2 < t <= 9	2 >=	>2
A	0.13	0.14	0.16	0.2		
B	0.5	0.48	0.44	0.39		
Al					0.46	0.56
a2					0.24	0.19
a3					0.62	0.8

1- Synoptic
2- Bell

نقشهٔ کاربری اراضی/ پوشش اراضی

نقشهٔ کاربری اراضی/ پوشش اراضی باید در قالب رستری یا TIF وارد نرم افزار InVEST شود (www.xiaoganghe.github.io). در این پژوهش، تصاویر ماهواره‌ای کاربری اراضی/ پوشش اراضی کلان‌شهر تبریز از سایت USGS Earth Explorer استخراج شد (https:\\earthexplorer.usgs.gov). برای تهیهٔ نقشهٔ کاربری اراضی/ پوشش اراضی از تصاویر ماهواره ای لندست ۵ برای سال‌های ۱۹۸۴ سنجنده TM و ۲۰۰۲ سنجنده ETM+ و لندست۸ برای سال ۲۰۲۲ سنجنده OLS، نرم افزار ENVI 5.8، GIS و روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال (MLC[1]) استفاده شد. تصاویر ماهواره‌ای مورد نظر مربوط به فصل تابستان، طول روز و تاریخ‌های ۱۹۸۴/۰۶/۲۴، ۲۰۰۲/۰۶/۲۶ و ۲۰۲۲/۰۶/۱۷ بوده است. برای ارزیابی صحت نقشه‌های به دست آمده از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، از روش نمونه‌برداری تصادفی (نمونه‌های تعلیمی) به عنوان نقاط واقعیت زمینی (نقاط کنترلی) استفاده شد. با به کارگیری نقاط کنترلی که از طریق تصاویر گوگل ارث، نقشه‌های کاربری اراضی و تفسیر بصری جمع آوری شده‌اند، دقت طبقه‌بندی با استفاده از ماتریس خطا و پارامترهای آماری (صحت کلی و ضریب کاپا)، محاسبه گردید که نشان دهندهٔ دقت بالای طبقه‌بندی است (جدول ۲). علت استفاده از روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال در این پژوهش قابلیت این روش در محاسبه دقیق احتمال تعلق هر پیکسل به کلاس‌های مختلف بر اساس توزیع آماری و ضریب همبستگی باندهای مورد استفاده در داده‌های آموزشی می‌باشد.

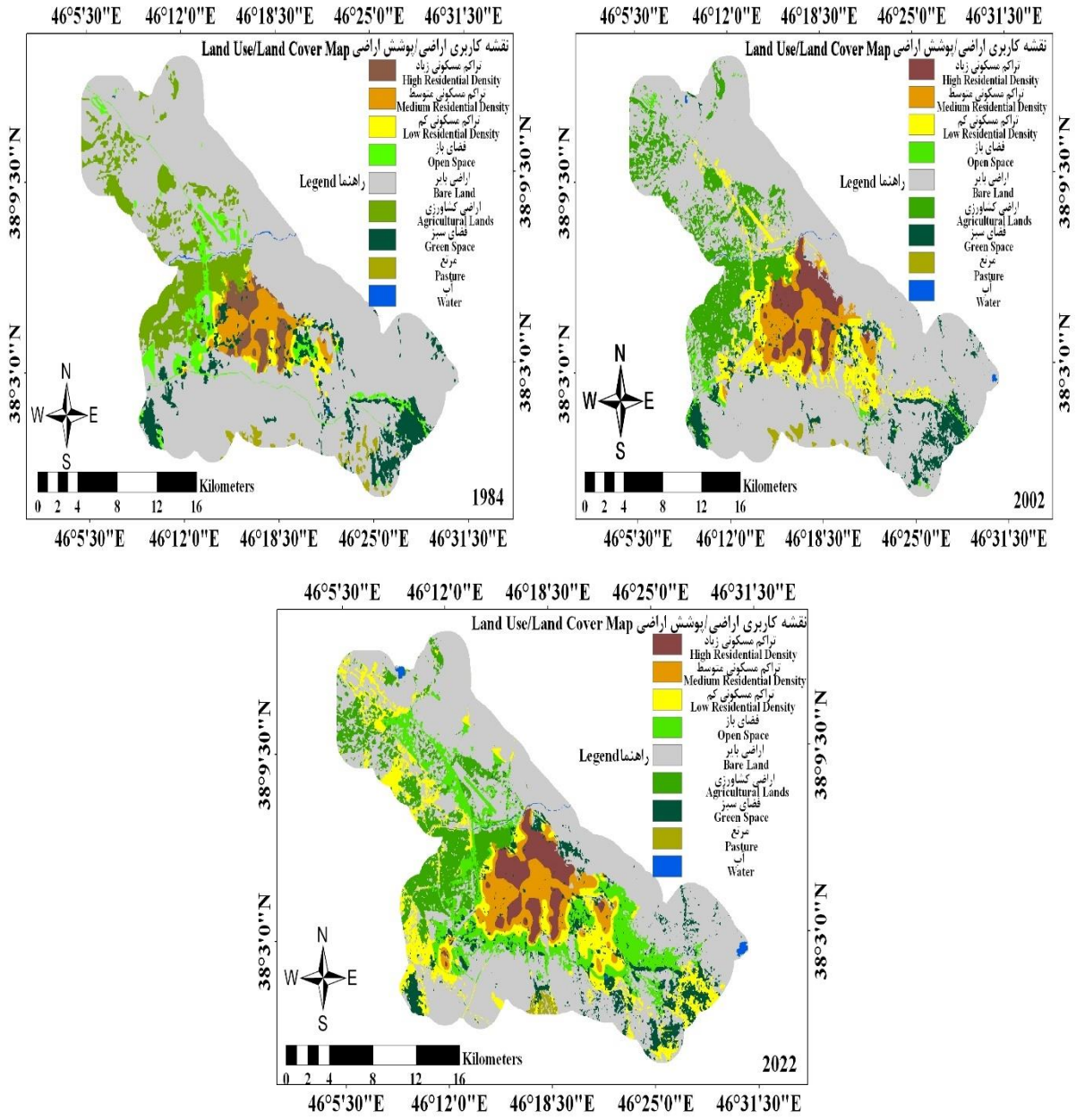
جدول۲- مقادیر ارزیابی صحت تصاویر طبقه بندی شده به روش حداکثر احتمال

Table 2- Accuracy assessment values of images classified by maximum likelihood method

سال **Year**	ضریب کاپا (٪) **Kappa Coefficient** (٪)	صحت کلی (٪) **Overall Accuracy** (٪)
1984	95	96/4
2002	93	95/2
2022	96/6	97/4

نقشه کاربری اراضی/ پوشش اراضی در ۹ کلاس شامل تراکم مسکونی زیاد، تراکم مسکونی متوسط، تراکم مسکونی کم، فضای باز، اراضی بایر، اراضی کشاورزی، فضای سبز، مرتع و آب با پیکسل ۳۰ متر تهیه شد. در این پژوهش کلاس کاربری تراکم مسکونی زیاد، تراکم مسکونی متوسط و تراکم مسکونی کم با استفاده از نقشه طرح جامع تبریز و هم پوشانی نقشه تراکم ساختمانی با لایهٔ کاربری اراضی در مرحله طبقه‌بندی و در مرحله پس پردازش با لایه برداری به دست آمده است. همچنین در این پژوهش کلاس کاربری اراضی کشاورزی، فضای سبز و مرتع از نظر موقعیت جغرافیایی، در شیب های متفاوت زمین قرار گرفته و در کنار بازتاب طیفی مختلف با استفاده از طبقه‌بندی و پس پردازش از هم جدا شده‌اند. با توجه به این که خارج از محدودهٔ مناطق شهرداری تبریز و در اطراف این مناطق زیرساخت‌های سبزی وجود دارد که در کاهش ریسک سیلاب شهری نقش دارند، از این رو برای این که بتوان به صورت کامل نقش زیرساخت‌های سبز را در کاهش ریسک سیلاب تبریز نشان داد، نقشه کاربری اراضی/ پوشش اراضی تبریز در حدود ۲۵۰ هکتار از تمام جهات بیشتر از محدوده مناطق دهگانه شهرداری در نظر گرفته شده و ترسیم گردید (شکل۲).

1-Maximum Likelihood Classification



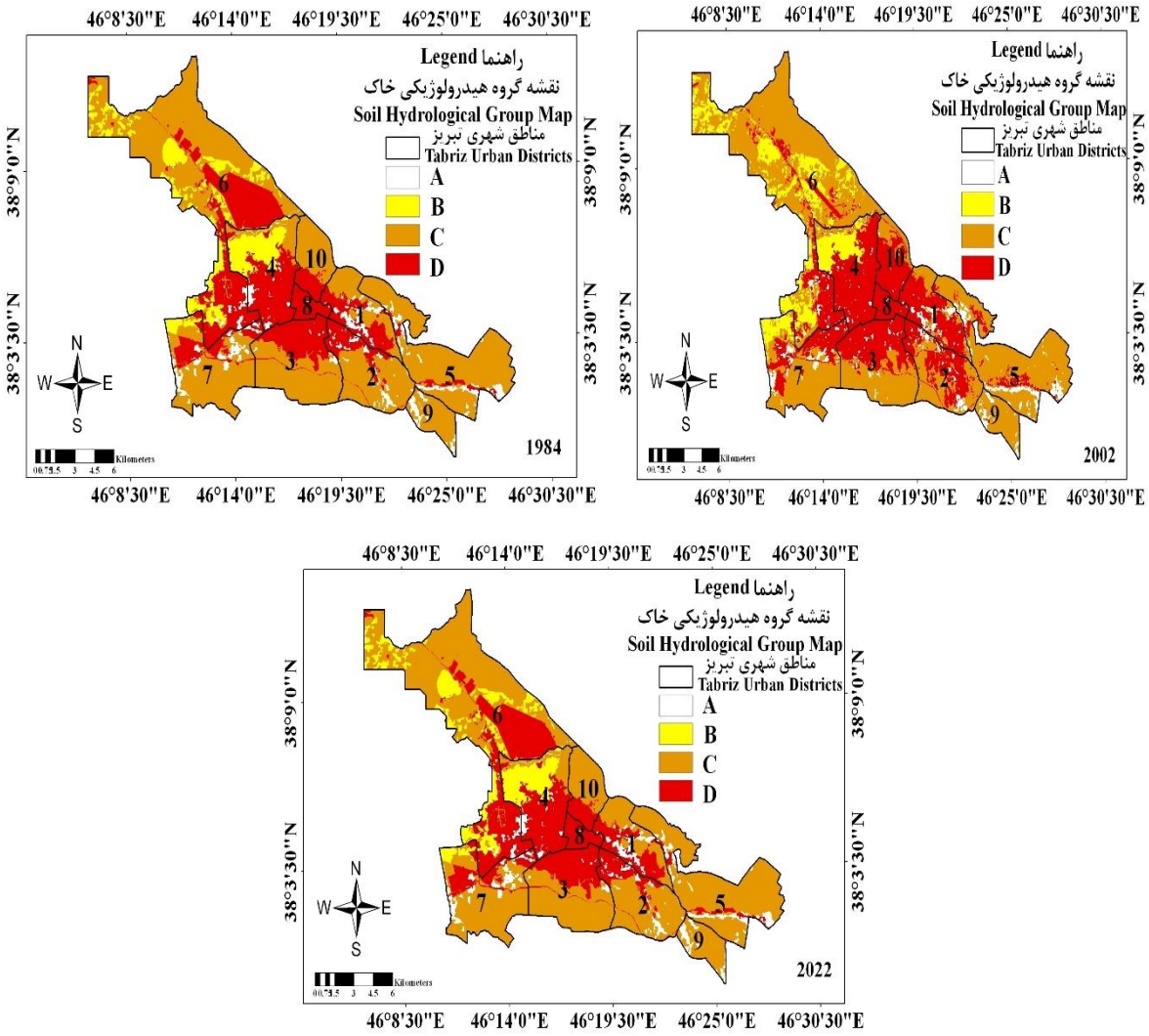
شکل ۲- نقشهٔ کاربری اراضی/ پوشش اراضی کلان‌شهر تبریز به ترتیب از چپ به راست برای سال های ۱۹۸۴، ۲۰۰۲ و ۲۰۲۲

Fig. 2. Land use/land cover map of Tabriz metropolis for 1984, 2002, and 2022(from left to right)

نقشهٔ رستری گروه هیدرولوژیکی خاک

نقشهٔ گروه هیدرولوژیکی خاک محدودهٔ مورد مطالعه باید به صورت رستری وارد نرم‌افزار InVEST شود (www.xiaoganghe.github.io). اطلاعات مربوط به گروه هیدرولوژیکی خاک کلان‌شهر تبریز از سایت https://www.futurewater.eu/2015/07/soil-hydraulic-properties/ اخذ شد. نقشهٔ گروه هیدرولوژیکی خاک محدوده مورد مطالعه از سازمان جهاد کشاورزی آذربایجان شرقی که برای دشت تبریز تهیه شده و به صورت کاغذی بود اخذ گردیده و سپس با

اسکن و تصحیح هندسی رقومی سازی آن انجام شد. در طی سال‌های ۱۳۶۳ و ۱۴۰۱ بیشتر خاک‌های تبریز (۸۶/۰۱ درصد) به ترتیب در گروه‌های هیدرولوژیکی C و D با پتانسیل رواناب نسبتا بالا و بالا و میزان کمتری از خاک های تبریز (۱۳/۹۹ درصد) در گروه‌های هیدرولوژیکی A و B با پتانسیل رواناب نسبتاً پایین و پایین و در سال ۱۳۸۱ نیز در حدود ۸۴/۵۹ درصد در گروه‌های هیدرولوژیکی C و D با پتانسیل رواناب نسبتاً بالا و بالا و در حدود ۱۵/۴۱ درصد در گروه‌های هیدرولوژیکی A و B با پتانسیل رواناب نسبتاً پایین و پایین قرار داشته است. یعنی به عبارتی در هر سه دوره زمانی ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱، قسمت عمده خاک‌های تبریز کمترین میزان از رواناب را در زیر زمین نفوذ داده و بیشترین میزان از رواناب را در سطح زمین جاری ساخته‌اند (شکل ۳).



شکل ۳- نقشه‌های رستری گروه هیدرولوژیکی خاک کلان‌شهر تبریز به ترتیب از چپ به راست برای سال‌های ۱۹۸۴، ۲۰۰۲ و ۲۰۲۲

Fig. 3. Raster maps of the soil hydrologic groups in Tabriz metropolis for 1984, 2002, and 2022 (from left to right)

جدول بیوفیزیکی

جدول بیوفیزیکی حاوی اطلاعاتی از داده‌های عدد منحنی برای هر یک از طبقات کاربری اراضی/ پوشش اراضی است (Vilca-Campana et al., 2024). داده‌های عدد منحنی (CN[1]) مهم‌ترین پیش نیاز ورودی مدل کاهش ریسک سیلاب شهری است. CN به طور گسترده‌ای برای تخمین میزان رواناب در سطح و نفوذ آن در خاک پس از مقدار معینی (Bose & Mazumdar, 2023)، مدیریت منابع آبی، مدل‌سازی سیلاب و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد (Gitika & Ranjan 2014; Tessema, Lyon, Setegn & Mörtberg, 2014; Soomro et al., 2019). CN نشان دهندۀ پتانسیل رواناب زمین است که متأثر از وضعیت پیشین رطوبت خاک (AMC)، نوع خاک، کاربری اراضی بوده و مقدار آن بین ۰ تا ۱۰۰ است. مقادیر بالاتر نشان دهندۀ پتانسیل بیشتر رواناب است (https://www.hec.usace.army.mil/ confluence/hmsdocs/hmstrm/cn-tables). یعنی به عبارتی مقادیر بالاتر نشان دهندۀ این است که خاک نفوذناپذیرتر بوده و آب ناشی از بارش را به جای زیر زمین در سطح زمین به صورت رواناب جاری می‌سازد. CN را می‌توان از طریق مدل SCS که به وسیله سازمان حفاظت خاک ایالات متحده تهیه شده به دست آورد (Row, 1976). در این پژوهش نیز میزان CN از طریق سایت سازمان مذکور اخذ گردید. در جدول ۳ میزان CN، برای هر گروه هیدرولوژیکی خاک کلان‌شهر تبریز برآورد شده است.

جدول ۳- جدول بیوفیزیکی مورد استفاده در مدل کاهش ریسک سیلاب شهری InVEST

Table 3- Biophysical table used in the InVEST urban flood risk mitigation model

lucode	Description	NEH type (to define CN)	CN_A	CN_B	CN_C	CN_D	SW_type	EMC
0	Background		1	1	1	1	7000	0
1	High Intensity Developed	Urban districts	89	92	94	95	8000	0.107
2	Medium Intensity Developed	Res districts	61	75	83	87	9000	0.077
3	Low Intensity Developed		51	68	79	84	10000	0.041
4	Open Space Developed	Open space	49	69	79	84	11000	0.012
5	Bare Land		77	86	91	94	7000	0
6	Cultivated Land	Small grain	63	75	83	87	5000	0
7	Deciduous Forest	Woods	36	60	73	79	5000	0
8	Pasture/Hay		49	69	79	84	3000	0
9	Water		1	1	1	1	6000	0

نقشه وکتوری زیرساخت‌های ساخته شده

در کل، زیرساخت‌های ساخته شده در یک محدوده شهری منعکس کننده امکانات و تسهیلات پایه‌ای و اساسی مانند حمل‌ونقل، ارتباطات، شبکه‌های برق و زیرساخت‌های مشابه است (Bose & Mazumdar, 2023). برای نقشه وکتوری زیرساخت‌های ساخته شده کلان‌شهر تبریز از نقشه طرح تفصیلی ۱۳۹۵ شهرداری تبریز استفاده شد.

جدول خسارات ناشی از سیلاب شهری

این جدول شامل داده‌های خسارت ناشی از سیلاب احتمالی برای هر نوع ساختمان است (www.xiaoganghe.github.io). در شهرها، ارزش‌گذاری زیرساخت‌های ساخته شده از منطقه‌ای به منطقه‌ای دیگر بسیار متفاوت است و از این رو جمع‌آوری این نوع

1- Curve Number

داده ها بسیار مشکل است. بنابراین جهت برآورد میزان خسارت اقتصادی، کل محدودهٔ کلان‌شهر تبریز انتخاب شده است. همچنین در این مورد، باید واحد پولی‌ای انتخاب شود که بتواند ارزش واقعی خسارات را به دست دهد (Bose & Mazumdar, 2023). از این رو در این پژوهش، واحد پولی دلار با توجه به پذیرش جهانی آن انتخاب شده است. در این پژوهش، تمامی ساختمان‌های موجود در شهر از نوع مسکونی و با کد ۰ در نظر گرفته شده و برای هر متر مربع خسارت ناشی از سیلاب شهری، ۱۰۰ دلار لحاظ شده است.

مدل کاهش ریسک سیلاب شهری

مدل کاهش سیلاب شهری نرم افزار InVEST برای مطالعهٔ خدمت اکوسیستمی کاهش سیل بر زیرساخت‌های طبیعی تمرکز دارد که در کاهش میزان رواناب ناشی از سیلاب نقش دارد. این مدل از جمله مدل‌هایی است که کاهش ریسک سیلاب شهری را بر اساس نقشه وکتوری محدودهٔ مورد مطالعه/ نقشهٔ حوضهٔ آبریز محدوده مورد مطالعه، میزان بارش (برحسب میلی متر)، نقشه کاربری اراضی/ پوشش اراضی، نقشه رستری گروه هیدرولوژیکی خاک، جدول بیوفیزیکی، نقشه وکتوری زیرساخت‌های ساخته شده، جدول خسارات ناشی از سیلاب شهری برآورد می‌کند. در نهایت این مدل نتیجه را از طریق فایل‌های رستری و وکتوری زیر برآورد می‌کند:

۱) میزان رواناب را در قالب داده‌های رستری محاسبه می‌کند.

۲) میزان جذب و نگهداشت رواناب (برحسب میلی متر) را در قالب فایل رستری که نشان دهندهٔ میزان نسبی بارندگی است، تخمین می‌زند (به صورت درصدی از بارندگی بیان می‌کند).

۳) حجم نگهداشت رواناب (برحسب متر مکعب) را از طریق فایل رستری محاسبه می‌کند.

۴) خطر سیل را در قالب یک جدول توصیفی و فیلد فایل‌های وکتوری و داده‌های رستری که از طریق مقادیر محاسبه شده به شناسایی تغییرات فضایی در محدوده‌های مکانی مشخص شده کمک می‌کند، محاسبه می‌کند.

۵) خسارت ناشی از سیل را از طریق ارزیابی پولی برآورد می‌کند.

۶) ارزش پولی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری را با استفاده از روش هزینه خسارت اجتناب شده در قالب جدول توصیفی برآورد می‌کند.

برای تجزیه و تحلیل زمانی مدل، میانگین بارش سال‌های مورد مطالعه و تغییرات کاربری اراضی/ پوشش اراضی مورد نیاز است. روابط (۴) و (۵) مدل مبتنی بر تغییرات کاربری اراضی، متغیری است که میزان رواناب و جذب و نگهداشت رواناب را تعیین می‌کند. برای محاسبه حجم جذب و نگهداشت رواناب در هر پیکسل، میزان رواناب i و Qp طبق رابطه (۱) عمل می‌شود (جدول ۴). به طوری که:

P: میزان بارندگی بر حسب میلی متر است. $Smaxi$: پتانسیل جذب و نگهداشت بر حسب میلی متر است. $\lambda Smax,i$: میزان بارندگی لازم برای شروع رواناب و $\lambda = 0.2$ است. $Smax$: تابعی از CN و پارامتر تجربی وابسته به l و ویژگی‌های کاربری اراضی/ پوشش اراضی و خاک است (رابطه (۲) در جدول ۴).

میزان حفظ و نگهداشت رواناب (برحسب میلی متر) در هر پیکسل با Ri طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود. حجم نگهداشت رواناب (برحسب متر مکعب) در هر پیکسل با R_m3i طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود. حجم رواناب (همچنین به عنوان «حجم سیل» نیز نامیده می‌شود) Q_m3i در هر پیکسل طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود (جدول ۴) (Vilca-Campana et al., 2024)

محاسبه خسارت ناشی از سیلاب احتمالی

ابتدا، ساختمان‌های آسیب دیده، بعد از آن مجموع خسارت احتمالی به دلار برای زیرساخت‌های ساخته شده و برای هر حوضه یا دهانه‌های شبکه‌های فاضلاب W به صورت زیر محاسبه می‌شود:

به طوری که طبق رابطه (۶):

b: میزان ساختمان‌های مسکونی از مجموع زیرساخت‌های ساخته شده B است. a (b, W): مساحت (متر مربع) ساختمان‌های b است که حوضهٔ آبریز W را قطع می‌کند. d(b): میزان خسارت به متر مربع/ واحد پول (جدول خسارت) برای نوع ساختمان b است (جدول ۴).

محاسبهٔ ارزش پولی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری

محاسبهٔ خدمت اکوسیستمی انجام شده که به صورت شاخصی از آسیب‌های اجتناب شده به زیرساخت‌های ساخته شده برای هر حوضهٔ W که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

به طوری که طبق رابطه (۷):

i یک پیکسل در حوضه W است و R_m3i حجم جذب و نگهداشت رواناب در هر پیکسل i است (جدول ۴).

جدول ۴- روابط ریاضی مدل InVEST

Table 4- Mathematical equations of the InVEST model

شماره روابط Equations Number	فرمول روابط Equation Formulations
1	$Q_{p,i} = \left\{ \frac{(P - \lambda S_{max})^2}{P + (1-\lambda) S_{max,i}} \right\}$ if $P > \lambda \cdot S_{max,i}$
2	$S_{max,i} = \frac{254000}{CN_i} - 254$
3	$R_i = 1 - \frac{Q_{p,i}}{P}$
4	$R_m_{3i} = R_i \cdot P \cdot \text{ pixel } \cdot \text{ area } \cdot 10^{-3}$
5	$Q_ m_{3i} = Qp,i \cdot P.pixel.area. 10^{-3}$
6	$\text{Affected.build}_w = \sum_{i \varepsilon w} a(b,W) \cdot d(b)$
7	$\text{Service.built}_W = \text{Affected.build}_W \cdot \sum_{i \varepsilon w} R_m3$
8	$R_t^T = At^B[a_1 + a_2 \ln (T - a_3) R_{60}^{10}]$
9	$R_{60}^{10} = e^{-\frac{0}{993}} (R_{1440}^2)^{\frac{1}{06}}$

ارزش خدمات انجام شده به صورت واحد پولی برای هر متر مکعب بیان می‌شود. این مورد باید به عنوان یک شاخص و نه به عنوان یک معیار واقعی برای ذخیره (مالی) در نظر گرفته شود (Sharp et al., 2020).

یافته‌های پژوهش

کاربری اراضی/ پوشش اراضی

بررسی روند تغییرات کاربری اراضی از سال ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۱ نشان می‌دهد که اراضی بایر و اراضی کشاورزی در این بازۀ زمانی ۳۸ ساله روند کاهشی داشته است، کاربری مسکونی از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۱ روند افزایشی (در حدود ۱۶/۵۴ درصد) داشته و از سال ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱، در حدود ۰/۵۰ درصد کاهش داشته است. فضای سبز نیز از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۸۱ روند کاهشی (۰/۸۷ درصد) داشته و از سال ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ در حدود ۰/۹۷درصد افزایش داشته است. در کل بررسی تغییرات کاربری اراضی مربوط به کلان‌شهر تبریز در بازۀ زمانی ۳۸ ساله نشان می‌دهد که کاربری‌های مرتبط با زیرساخت‌های سبز از قبیل فضای سبز، اراضی کشاورزی و مرتع که نقش فزاینده‌ای در کاهش ریسک سیلاب شهری دارند، کمترین میزان از کل کاربری‌های شهری تبریز را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۲ و جدول‌های ۵، ۶ و ۷).

جدول ۵- داده‌های مربوط به کاربری اراضی/ پوشش اراضی سال ۱۳۶۳ مناطق دهگانه کلان‌شهر تبریز به درصد

Table 5- Land Use/Land Cover Data for the Ten Zones of Tabriz Metropolis in 1984 (percent)

کاربری اراضی/ پوشش اراضی land use/land cover									
مناطق Districts	تراکم مسکونی زیاد (کد۱) High Residential Density (Code 1)	تراکم مسکونی متوسط (کد۲) Medium Residential Density (Code 2)	تراکم مسکونی کم (کد۳) Low Residential Density (Code 3)	فضای باز (کد۴) Open Space (Code 4)	اراضی بایر (کد۵) Waste land (Code 5)	اراضی کشاورزی(کد۶) Agricultural Land (Code 6)	فضای سبز (کد۷) Green Space (Code 7)	مرتع (کد۸) Pasture (Code 8)	آب (کد۹) Water (Code 9)
1	3.53	18.58	9.83	5.97	48.08	-	13.98	-	-
2	2.45	4.54	10.41	4.14	68.20	-	10.04	-	0.21
3	14.09	10.72	6.17	1.70	65.60	-	1.71	-	-
4	23.40	19.37	2.01	1.83	16.12	32.08	4.50	-	0.68
5	-	0.13	0.71	3.90	86.89	-	8.36	-	-
6	0.12	1.88	1.85	11.94	65.25	17.48	1.40	-	0.05
7	0.53	3.09	1.39	7.67	70.32	6.08	10.91	-	-
8	28.43	66.25	3.73	1.58	-	-	-	-	-
9	-	-	-	0.89	73.86	-	16.94	8.30	-
10	3	21.28	-	-	75.71	-	-	-	-
کل مناطق All Districts	4.78	7.32	3.18	6.33	62.97	9.42	5.63	0.25	0.10

جدول ۶- داده‌های مربوط به کاربری اراضی/ پوشش اراضی سال ۱۳۸۱ مناطق دهگانه کلان‌شهر تبریز به درصد

Table 6- Land Use/Land Cover Data for the Ten Zones of Tabriz Metropolis in 2002 (percent)

کاربری اراضی/پوشش اراضی land use/land cover									
مناطق Districts	تراکم مسکونی زیاد (کد۱) High Residential	تراکم مسکونی متوسط (کد۲) Medium Residential	تراکم مسکونی کم (کد۳) Low Residential	فضای باز (کد۴) Open Space	اراضی بایر (کد۵) Waste	اراضی کشاورزی(کد۶) Agricultural Land (Code 6)	فضای سبز (کد۷) Green Space	مرتع (کد۸) Pasture (Code 8)	آب (کد۹) Water (Code 9)

		(Code 7)		land (Code 5)	(Code 4)	Density (Code 3)	Density (Code 2)	Density (Code 1)	
-	-	10.98	-	23.59	-	23.38	28.06	13.98	1
0.17	0.022	7.72	-	45.53	2.55	34.63	6.79	2.59	2
-	0.011	3.07	-	48.19	-	21.17	12.93	14.62	3
0.62	-	1.83	24.37	6.91	-	9.73	25.51	31.02	4
-	0.0043	9.82	-	81.14	0.59	7.92	0.51	-	5
0.065	-	1.14	21.69	63.09	0.60	10.96	2.24	0.19	6
-	0.011	7.25	10.71	54.80	1.32	17.47	7.61	0.81	7
-	-	0.79	-	-	-	3.73	66.95	28.52	8
-	-	13.55	-	85.21	0.66	0.57	-	-	9
-	-	0.58	-	28.66	-	3.26	25.22	42.28	10
0.095	0.0048	4.76	10.55	52.10	0.65	14.15	9.76	7.91	کل مناطق All Districts

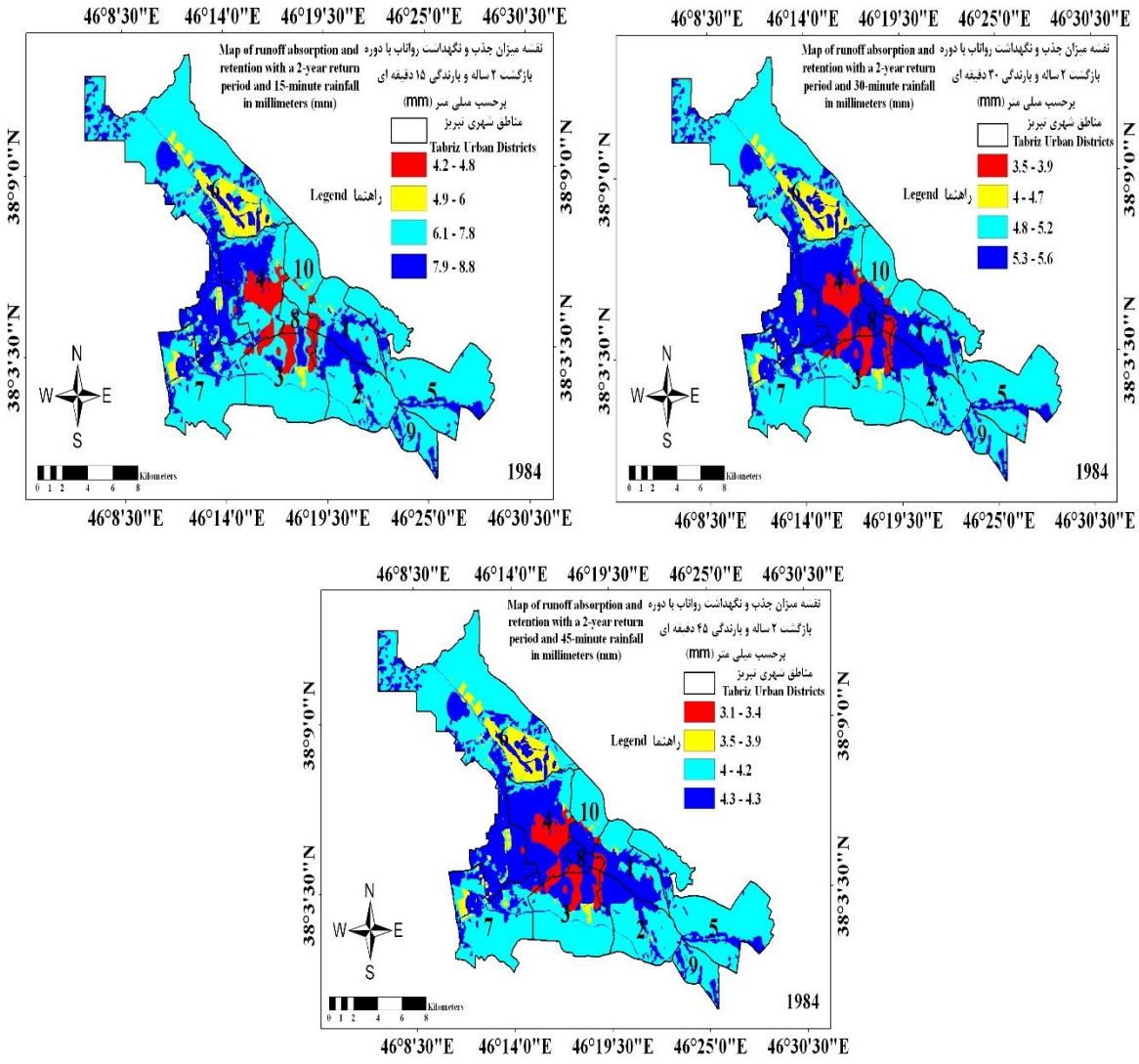
جدول ۷- داده‌های مربوط به کاربری اراضی/ پوشش اراضی سال ۱۴۰۱ مناطق دهگانه کلان‌شهر تبریز به درصد

Table 7- Land Use/Land Cover Data for the Ten Zones of Tabriz Metropolis in 2022 (percent)

کاربری اراضی/پوشش اراضی land use/land cover									
آب (کد۹) Water (Code 9)	مرتع (کد۸) Pasture (Code 8)	فضای سبز (کد۷) Green Space (Code 7)	اراضی کشاورزی(کد۶) Agricultural Land (Code 6)	اراضی بایر (کد۵) Waste land (Code 5)	فضای باز (کد۴) Open Space (Code 4)	تراکم مسکونی کم (کد۳) Low Residential Density (Code 3)	تراکم مسکونی متوسط (کد۲) Medium Residential Density (Code 2)	تراکم مسکونی زیاد (کد۱) High Residential Density (Code 1)	مناطق Districts
-	-	8.66	-	10.36	13.97	19.55	31.78	15.67	1
0.30	-	12.96	0.15	13.60	19.70	41.54	9.16	2.57	2
-	0.00094	4.07	0.080	35.09	21.04	11.42	13.35	14.93	3
0.60	-	3.09	19.74	5.58	6.48	6.47	26.53	31.50	4
-	-	11.83	0.0014	43.39	35.88	6.23	2.66	-	5
0.060	-	0.81	16.96	51.52	20.45	7.74	2.26	0.18	6
-	-	7.39	5.98	34.24	25.45	16.05	9.70	1.18	7
-	-	0.111	-	-	-	3.73	67.23	28.92	8
-	-	9.70	-	52.03	27.50	10.76	-	-	9
-	-	10.54	-	10.98	0.49	4.09	27.76	46.13	10
0.101	0.000098	5.73	8.07	34.31	20.45	12.05	10.97	8.30	کل مناطق All Districts

ظرفیت حفظ و نگهداشت رواناب در بین مناطق دهگانهٔ کلان‌شهر تبریز

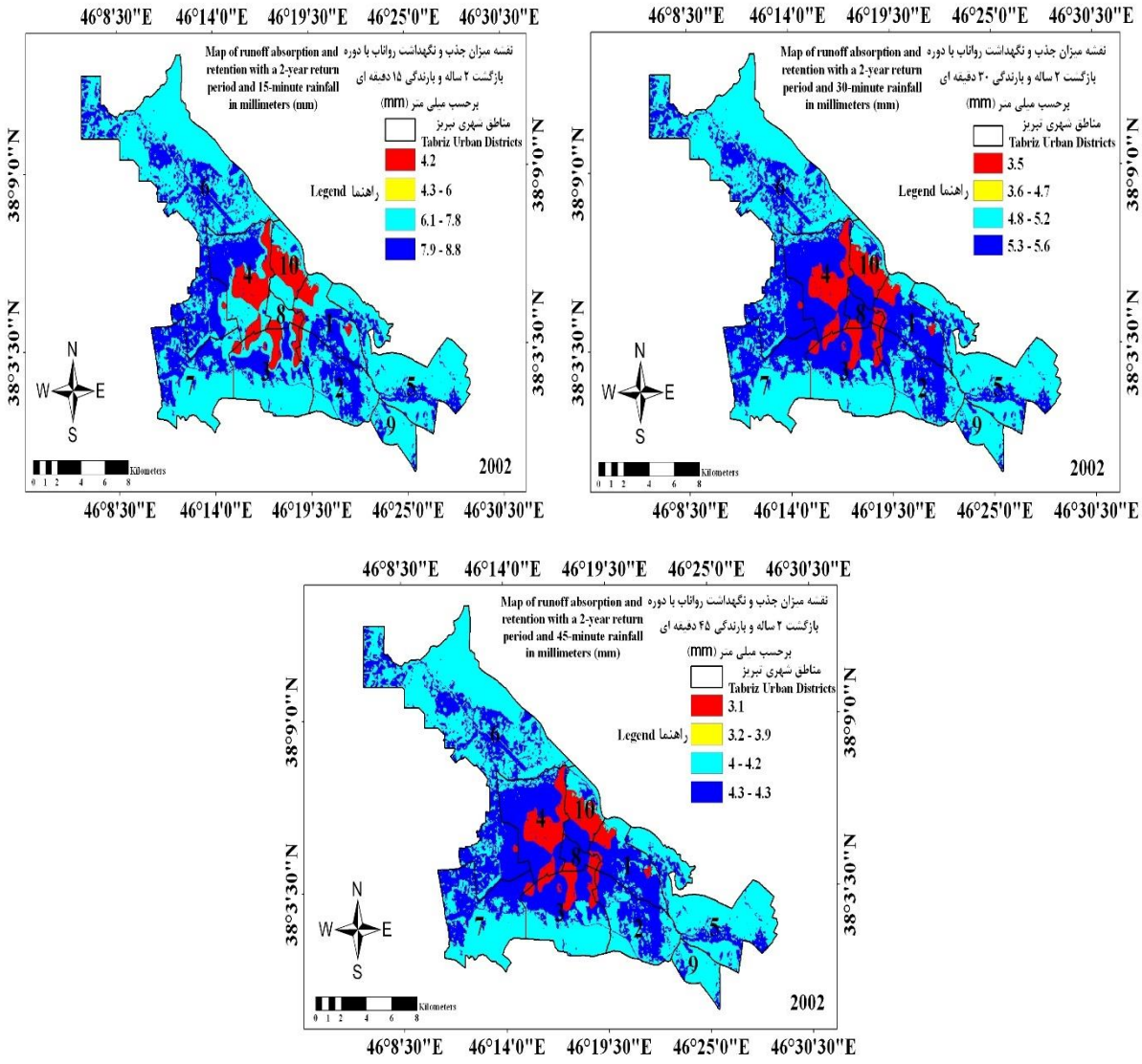
در سال ۱۳۶۳ با بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای و با میزان بارش ۲۱/۹۳ میلی متری (۰/۰۰۰۰۲۲ متر مکعب) در کلاس بیشترین میزان (۸/۷۷ متر مکعب) به ترتیب مناطق ۶، ۴ و ۷ با ۳۴/۶۰، ۱۸/۱۴ و ۱۰/۱۹ درصد رتبه‌های اول تا سوم و منطقهٔ ۹ هم با ۲/۴۳درصد رتبهٔ آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۳۶۳ با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای در کلاس بیشترین میزان (۵/۶۳ متر مکعب) مناطق ۶، ۴ و ۷ با ۳۴/۶۰، ۱۸/۱۴ و ۱۰/۱۹درصد رتبه‌های اول تا سوم و منطقه ۹ با ۲/۴۳ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۳۶۳ با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای و دورهٔ بازگشت ۲ ساله در کلاس بیشترین میزان (۴/۳۱ متر مکعب)، مناطق ۶، ۵ و ۷ هم به ترتیب با ۳۱/۲۸، ۱۱/۱۵،۸۱/۱۴درصد رتبه‌های اول تا سوم و منطقهٔ ۸ با ۱/۱۷ درصد رتبهٔ آخر را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۴).



شکل ۴- نقشه‌های میزان جذب و نگهداشت رواناب ناشی از بارش سال ۱۹۸۴ کلان‌شهر تبریز با دورهٔ بازگشت ۲ ساله و بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای بر حسب متر مکعب (m^3) به ترتیب از چپ به راست

Fig. 4. Maps of Runoff Retention and Infiltration Capacity in Tabriz Metropolis for 1984 under a 2-Year Return Period and 15, 30, and 45 Minute Rainfall Durations (m^3), from left to right

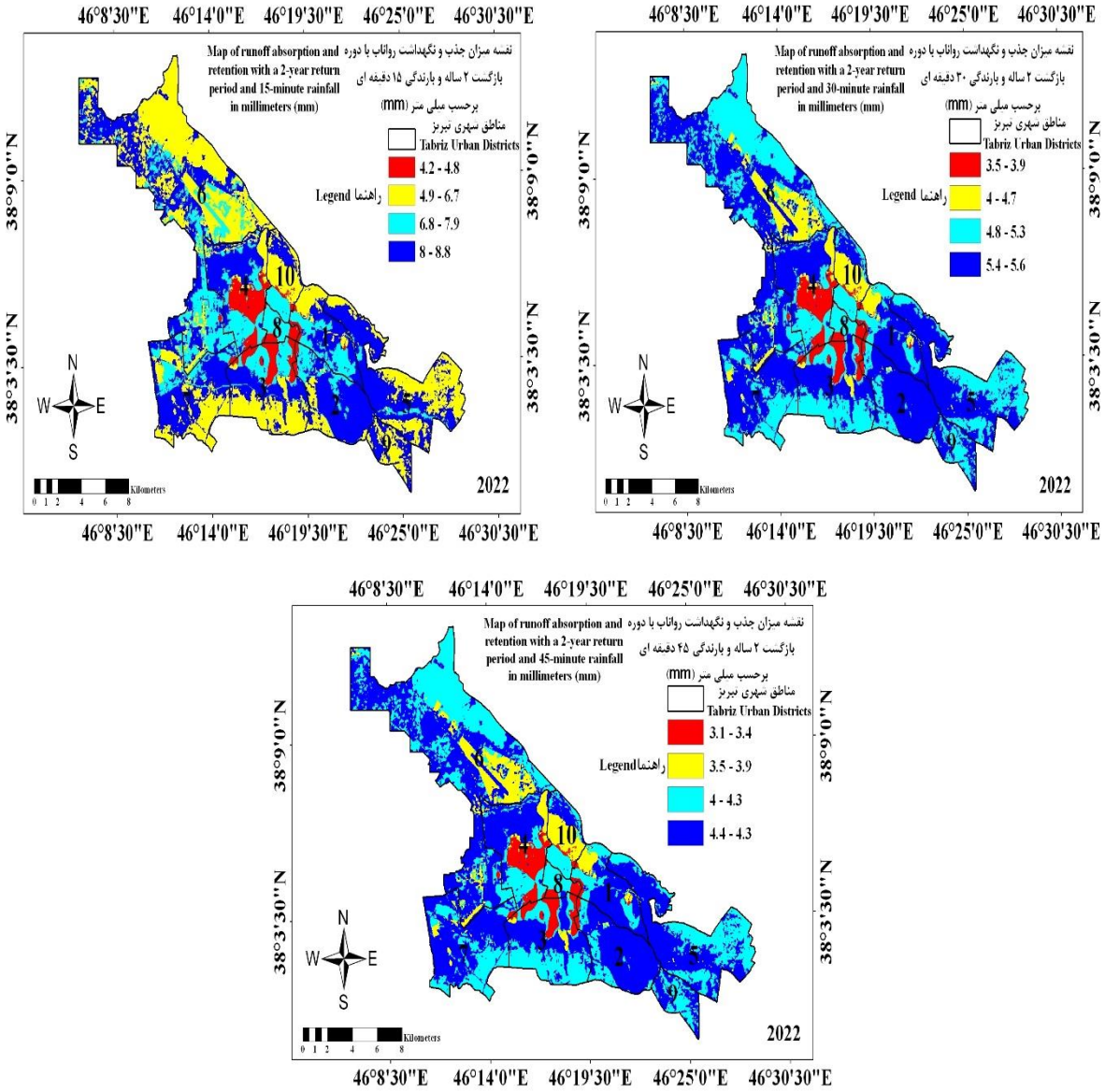
در سال ۱۳۸۱ با میزان بارش ۱۴/۰۷ میلیمتری (۰/۰۰۰۰۱۴ متر مکعب) با بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای در کلاس بیشترین میزان (۸/۷۷ متر مکعب) مناطق ۹، ۸ و ۱۰ به ترتیب با ۲۹/۶۱، ۱۵، ۱۲/۵۲درصد رتبه‌های اول تا سوم و منطقه ۶ با ۱/۱۱ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۳۸۱ با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای در کلاس بیشترین میزان (۵/۶۳ متر مکعب) مناطق ۶، ۴ و ۷ به ترتیب با ۲۹/۶۱، ۱۵، ۱۲/۵۲ درصد رتبه‌های اول تا سوم و منطقه ۹ با ۱/۱۱ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۳۸۱ با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای و با دوره بازگشت ۲ ساله در کلاس بیشترین میزان (۴/۳۱ متر مکعب) مناطق ۶، ۵ و ۷ به ترتیب با ۳۴/۹۴، ۱۴/۸۱، ۱۲/۱۵درصد رتبه‌های اول تا سوم و منطقه ۸ با ۱/۱۴ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۵).



شکل ۵- نقشه‌های میزان جذب و نگهداشت رواناب ناشی از بارش سال ۲۰۰۲ کلان‌شهر تبریز با دورهٔ بازگشت ۲ ساله و بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای بر حسب متر مکعب (m^3) به ترتیب از چپ به راست

Fig. 5. Maps of Runoff Retention and Infiltration Capacity in Tabriz Metropolis for 2002 under a 2-Year Return Period and 15, 30, and 45 Minute Rainfall Durations (m^3), from left to right

در سال ۱۴۰۱ با میزان بارش ۱۰/۷۸ میلی متری (۰/۰۰۰۰۱۱ متر مکعب) با بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای در کلاس بیشترین میزان (۸/۷۷ متر مکعب) مناطق ۶، ۵، ۷ به ترتیب با ۲۸/۶۷، ۱۳/۰۴، ۱۲/۶۴ درصد رتبه‌های اول تا سوم و منطقه ۸ با ۱/۷۵ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۴۰۱ با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای در کلاس بیشترین میزان (۵/۶۳ متر مکعب) مناطق ۶، ۵، ۷ به ترتیب با ۲۸/۶۳، ۱۳/۰۲، ۱۲/۶۴درصد رتبه‌های اول تا سوم و منطقه ۸ با ۱/۷۶ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۴۰۱ با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای و دورهٔ بازگشت ۲ ساله در کلاس بیشترین میزان (۴/۳ متر مکعب) مناطق ۶، ۵ و ۷ به ترتیب با ۳۲/۱۷، ۱۵/۶، ۱۲/۵ درصد رتبه‌های اول تا سوم و منطقه ۸ با ۱/۲ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۶).



شکل ۶- نقشه‌های میزان جذب و نگهداشت رواناب ناشی از بارش سال ۲۰۲۲ کلان‌شهر تبریز با دورهٔ بازگشت ۲ ساله و بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای بر حسب متر مکعب (m^3) به ترتیب از راست به چپ

Fig. 6. Maps of Runoff Retention and Infiltration Capacity in Tabriz Metropolis for 2022 under a 2-Year Return Period and 15, 30, and 45 Minute Rainfall Durations (m^3), from right to left

در کل در سال‌های ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ با بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای و دورهٔ بازگشت ۲ ساله در پتانسیل جذب و نگهداشت رواناب، مناطق ۶، ۵، ۷، ۳، ۴، ۲، ۱، ۱۰، ۹ و ۸ به ترتیب با ۳۲/۲۳، ۱۳/۶۳، ۱۱/۲۸، ۱۰/۳۵، ۹/۶۷، ۸/۰۴، ۶/۱۶، ۴/۱۶، ۳ و ۱/۴۷ درصد رتبه‌های اول تا دهم را به خود اختصاص داده‌اند. به عبارتی در بین مناطق دهگانه کلان‌شهر تبریز در هر سه دوره، مناطق ۶، ۵ و ۷ توانسته‌اند بیشترین میزان رواناب را جذب کرده و در زمین نفوذ دهند. همچنین مناطق ۹ و ۸ کمترین میزان رواناب را توانسته‌اند جذب کرده و در زمین نفوذ دهند.

ظرفیت جذب و نگهداشت رواناب در رابطه با کاربری اراضی/ پوشش اراضی کلان‌شهر تبریز

در سال ۱۳۶۳ با بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای و بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای در رابطه با کاربری اراضی/ پوشش اراضی، در کلاس بیشترین میزان (۸/۷۷ متر مکعب)، کاربری‌های اراضی کشاورزی، تراکم مسکونی متوسط و فضای باز به ترتیب با ۲۹/۱۵، ۲۲/۶۵ و ۱۹/۵۶درصد رتبه‌های اول تا سوم و تراکم مسکونی زیاد با ۰/۰۴ درصد رتبهٔ آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۳۶۳ با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای و دورهٔ بازگشت ۲ ساله در کلاس بیشترین میزان (۴/۳۱ متر مکعب)، کاربری‌های اراضی بایر، اراضی کشاورزی و تراکم مسکونی متوسط با ۶۴/۲۲ ، ۱۰/۴۴ و ۸/۱۲ درصد رتبه‌های اول تا سوم و تراکم مسکونی زیاد با ۰/۰۲ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در کل در سال ۱۳۶۳ در طی بارندگی های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای و با دوره بازگشت ۲ ساله در پتانسیل جذب و نگهداشت رواناب، کاربری‌های اراضی بایر، اراضی کشاورزی و تراکم مسکونی متوسط توانسته‌اند بیشترین میزان رواناب را جذب کرده و به زمین نفوذ دهند و کاربری‌های مرتع و آب توانسته‌اند کمترین میزان رواناب را جذب کنند.

در سال ۱۳۸۱ با بارندگی‌های ۱۵ و ۳۰ دقیقه‌ای، در کلاس بیشترین میزان به ترتیب ۸/۷۷ و ۵/۶۳ متر مکعب، کاربری‌های تراکم مسکونی کم، اراضی کشاورزی و تراکم مسکونی متوسط با ۳۵/۱۸، ۲۶/۲۸ و ۲۴/۳۳ درصد رتبه‌های اول تا سوم و کاربری مرتع با ۰/۰۱ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۳۸۱ با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای، در کلاس بیشترین میزان (۴/۳۱ متر مکعب)، کاربری‌های اراضی بایر، تراکم مسکونی کم و اراضی کشاورزی به ترتیب با ۵۶/۵۷، ۱۵/۳۸ و ۱۱/۴۶ درصد رتبه‌های اول تا سوم و کاربری مرتع با ۰/۰۱ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۳۸۱ در طی هر سه بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای و با دوره بازگشت ۲ ساله کاربری‌های اراضی بایر، تراکم مسکونی کم و اراضی کشاورزی توانسته‌اند بیشترین میزان رواناب را جذب کرده و در زمین نفوذ دهند و کاربری‌های آب و مرتع، توانسته‌اند کمترین میزان رواناب را جذب کنند.

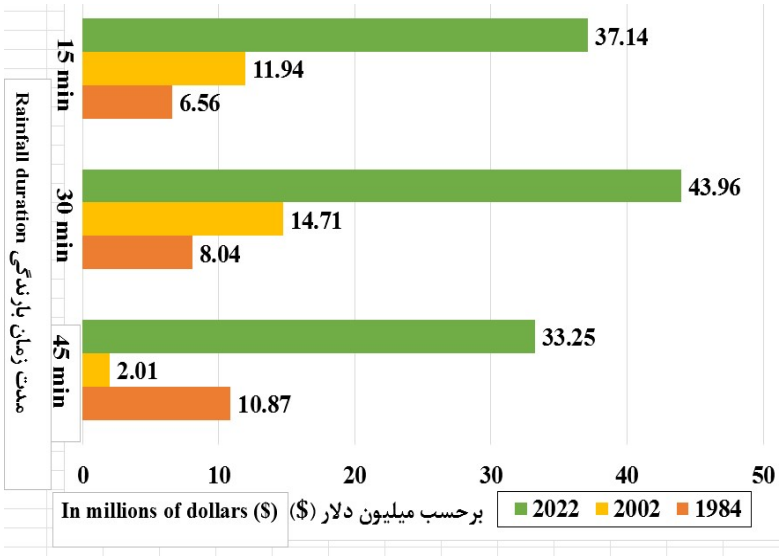
در سال ۱۴۰۱ با بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای، در کلاس بیشترین میزان (۸/۷۷ متر مکعب) کاربری‌های فضای باز، تراکم مسکونی کم و تراکم مسکونی متوسط به ترتیب با ۳۴/۱۵، ۲۰/۱۵ و ۱۸/۳۶ درصد رتبه‌های اول تا سوم و کاربری مرتع با ۳۰۰ (۰/۰۰۰۲ درصد) رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۴۰۱ با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای، در کلاس بیشترین میزان (۵/۶۳ متر مکعب) کاربری‌های فضای باز، تراکم مسکونی کم و تراکم مسکونی متوسط با ۳۴/۰۸، ۲۰/۱۰ و ۱۸/۳۲ درصد رتبه‌های اول تا سوم و کاربری مرتع با ۰/۰۰۰۲ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در سال ۱۴۰۱ با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲ ساله، در کلاس بیشترین میزان (۴/۳۱ متر مکعب) کاربری‌های اراضی بایر، فضای باز و تراکم مسکونی کم با ۳۳/۹۲، ۲۳/۴۳ و ۱۳/۸۱ درصد رتبه‌های اول تا سوم و کاربری مرتع با ۰/۰۰۰۱ درصد رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. در کل در سال ۱۴۰۱ در طی بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای و دورهٔ بازگشت ۲ ساله کاربری‌های اراضی بایر، فضای باز و تراکم مسکونی کم توانسته‌اند بیشترین میزان از رواناب را جذب کرده و به زمین نفوذ دهند و کاربری‌های آب و مرتع نیز تنها توانسته‌اند کمترین میزان از رواناب را جذب کنند.

ارزیابی ارزش پولی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری با استفاده از روش هزینه خسارت اجتناب شده

در سال ۱۳۶۳ با میزان بارش ۲۱/۹۳ میلی متری (۰/۰۰۰۰۲۲ متر مکعب)، بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای، حجم آب جذب و نگهداشته شده ۴/۲۸ میلیون متر مکعب، و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۱۰/۸۷ میلیون دلار، با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای، حجم آب جذب و نگهداشته شده ۳/۱۷ میلیون متر مکعب، و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۸/۰۴ میلیون دلار و بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲ ساله، حجم آب جذب و نگهداشته شده ۲/۵۸ میلیون متر مکعب، و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۶/۵۶ میلیون دلار برای کلان‌شهر تبریز بوده است.

در سال ۱۳۸۱ با میزان بارش ۱۴/۰۷ میلیمتری (۰/۰۰۰۰۱۴ متر مکعب)، بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای، حجم آب جذب و نگهداشته شده ۴/۳۷ میلیون متر مکعب، و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۲/۰۱ میلیون دلار، با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای، حجم آب جذب و نگهداشته شده ۳/۲۱ میلیون متر مکعب، و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۱۴/۷۱ میلیون دلار و بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای و دوره بازگشت ۲ ساله حجم آب جذب و نگهداشته شده ۲/۶۰ میلیون متر مکعب، و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۱۱/۹۴ میلیون دلار برای کلان‌شهر تبریز بوده است.

در سال ۱۴۰۱ با میزان بارش ۱۰/۷۸ میلی متری (۰/۰۰۰۰۱۱ متر مکعب)، بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای، حجم آب جذب و نگهداشته شده ۴/۶۵ میلیون متر مکعب، و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۳۳/۲۵ میلیون دلار، با بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای، حجم آب جذب و نگهداشته شده ۶/۱۵ میلیون متر مکعب، و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۴۳/۹۶ میلیون دلار و بارندگی ۴۵ دقیقه و دورهٔ بازگشت ۲ ساله حجم آب جذب و نگهداشته شده ۵/۲۰ میلیون متر مکعب، و میزان منفعت خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری ۳۷/۱۴ میلیون دلار برای کلان‌شهر تبریز بوده است که اگر این خدمت اکوسیستمی نبود بایستی همین میزان منفعت ناشی از آن برای جبران خسارت اقتصادی ناشی از سیلاب احتمالی صرف می‌شد (شکل ۷).



شکل ۷- میزان منفعت اقتصادی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری تبریز بر اساس دلار برای بارندگی های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای با دورهٔ بازگشت ۲ ساله برای سال های ۱۹۸۴، ۲۰۰۲ و ۲۰۲۲

Fig. 7. Economic Benefit of the Ecosystem Service for Urban Flood Risk Mitigation in Tabriz, in US dollars, for 15, 30, and 45-minute rainfall events with a 2-year return period for the years 1984, 2002, and 2022

نتایج و بحث

در طی هر سه دوره ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ نوع خاک بیشتر قسمت های مناطق دهگانه کلان‌شهر تبریز (به جز قسمت‌هایی از مناطق ۴، ۶ و ۷ و قسمت‌های کوچکی از مناطق دیگر) از نوع لوم و رسی بوده که قابلیت رواناب نسبتاً بالا و بالایی دارد، یعنی به عبارتی قسمت عمده خاک‌های تبریز، بخش بزرگی از رواناب حاصل از بارندگی را به جای نفوذ در زمین در سطح زمین جاری می‌سازند که این امر موجب می‌شود، بیشتر مناطق تبریز دارای پتانسیل رواناب بالایی بوده و در معرض خطر سیلاب شهری باشد. از این رو در کلان‌شهر تبریز در طی هر سه دوره ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱، در طی هر سه بارندگی‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای و با دورهٔ بازگشت ۲ ساله، مناطق با وسعت بزرگ و نسبتاً بزرگ تبریز از جمله مناطق ۶، ۵ و ۷ که نوع خاک قسمت‌هایی از مناطق ۶ و ۷ با پتانسیل رواناب پایین و نسبتاً پایین (A و B) می‌باشد و کاربری قسمت‌های زیادی از منطقه ۵ از کاربری‌های اراضی بایر، فضای باز و فضای سبز تشکیل شده، دارای ظرفیت جذب رواناب بالایی می‌باشد و مناطق با وسعت کوچک و نسبتاً کوچک تبریز یعنی مناطق ۹ و ۸ که بیشتر نوع خاک آن ها از خاک با پتانسیل رواناب بالا (C و D) تشکیل شده، دارای ظرفیت جذب رواناب پایینی می‌باشند.

افزایش روند مستمر شهرنشینی، تغییرات زیاد کاربری اراضی، افزایش ساخت و سازها و تراکم‌های شهری تبریز در طی دهه‌های اخیر باعث شده که قسمت‌های زیادی از این کلان‌شهر به سطوح غیر قابل نفوذ تبدیل گردد، چنان که کمترین میزان جذب و نگهداشت رواناب در طی هر سه دوره مربوط به کاربری تراکم مسکونی زیاد بوده است. از این حیث پژوهش حاضر با پژوهش‌های انجام شده داخلی و خارجی از جمله پژوهش‌های قدبیگی و همکاران (Ghadbeygi et al., 2024) و پژوهش احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2021)، پژوهش گو و لیو (Gu & Liu, 2024) و پژوهش وو و همکاران (Wu at al., 2024) که در این پژوهش‌ها نیز به ترتیب عامل تراکم به ویژه ساختمان‌های با تراکم بالا و تراکم جمعیت بیشترین نقش را در افزایش ریسک سیلاب شهری داشته‌اند، مطابقت دارد.

مرتع اولین کاربری‌ای است که در بین کاربری‌های دیگر کلان‌شهر تبریز دارای پتانسیل رواناب پایینی می‌باشد، کاربری‌های آب، فضای سبز و... در رتبه‌های بعدی قرار دارند، دلیل این که چرا فضای سبز تبریز دارای ظرفیت جذب رواناب پایینی است، این است که فضای سبز تبریز در هر سه دوره ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ درصد ناچیزی از کل کاربری‌های تبریز را به خود اختصاص داده است، به طوری که در طی این سه دوره به ترتیب ۶/۲۵، ۵/۳۸ و ۶/۲۳ درصد از کاربری اراضی شهری مربوط به این کاربری بوده و همچنین این که اراضی دارای پوشش گیاهی و علفزارها از جمله فضاهای سبز عمدتاً میزان مشخصی از بارندگی را جذب می‌کنند، به عبارتی دارای ظرفیت جذب معینی بوده و بیشتر از آن را نمی‌توانند جذب کنند و بقیه را به صورت رواناب در سطح زمین جاری می‌سازند. چنان چه در طی هر دو دوره ۱۳۶۳ و ۱۳۸۱ با افزایش مدت زمان بارندگی از ۱۵ به ۳۰ و از ۳۰ به ۴۵ دقیقه ظرفیت جذب و نگهداشت کاربری اراضی/ پوشش اراضی تبریز کاهشی بوده ولی در سال ۱۴۰۱ این روند افزایشی بوده است که این میزان افزایش در این سال می‌تواند ناشی از کاهش سطوح غیر قابل نفوذ از جمله کاربری مسکونی به میزان ۰/۵۰ بوده باشد. همچنین این که میزان جذب و نگهداشت رواناب در سال ۱۴۰۱ در طی بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای نسبت به بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای نیز کاهشی بوده است. در طی هر سه دوره زمانی و در طی هر سه مدت زمان بارندگی میزان ظرفیت جذب و نگهداشت کاربری اراضی/ پوشش اراضی تبریز با وجود افزایش سطوح غیر قابل نفوذ افزایشی بوده است. به دلیل این که گروه هیدرولوژیکی خاک بیشتر قسمت‌های کلان‌شهر تبریز با پتانسیل رواناب نسبتاً بالا و بالا بوده است، بنابراین در این افزایش کاربری اراضی/ پوشش اراضی و تغییرات آن تأثیرگذارتر بوده است. در کل در طی هر سه دوره ۱۳۶۳، ۱۳۸۱ و ۱۴۰۱ در کلان‌شهر تبریز، زیرساخت های سبز (فضای سبز، اراضی کشاورزی و مرتع) نسبت به زیرساخت های آبی به جز یک مورد (بارندگی ۱۵ دقیقه‌ای سال ۱۳۸۱) نقش بیشتری در کاهش ریسک سیلاب شهری داشته است که از این جهت پژوهش حاضر با پژوهش وانگ و همکاران (Wang et al., 2024) مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، ارزیابی نقش خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری کلان‌شهر تبریز بوده است. نتایج نشان داد که مناطقی که در آن‌ها تراکم جمعیتی و به تبع آن کاربری با تراکم مسکونی زیاد بیشتر بوده، کمترین میزان جذب و نگهداشت رواناب را داشته‌اند. در کلان‌شهر تبریز به دلیل ناچیز بودن میزان کاربری‌های مرتبط با زیرساخت‌های سبز از جمله فضای سبز، اراضی کشاورزی و مرتع، این کاربری‌ها نقش چندان زیادی در کاهش ریسک سیلاب شهری (جذب و نگهداشت رواناب) نداشته‌اند. زیرساخت‌های سبز در مقایسه با زیرساخت‌های آبی نقش بیشتری را در کاهش ریسک سیلاب شهری تبریز داشته‌اند. همچنین در پتانسیل جذب و نگهداشت رواناب، کاربری اراضی/ پوشش اراضی در مقایسه با گروه هیدرولوژیکی خاک نقش بیشتری را داشته است. همچنین نتایج نشان داد که نقش خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری تبریز نسبتاً چشمگیر بوده است که اگر این نقش نبود کلان‌شهر تبریز باید متحمل هزینه‌های ناشی از ریسک سیلاب احتمالی و خسارات تصاعدی آن می‌شد. مدل InVEST در ارزیابی خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری (UFRM) تبریز، در سطح متوسط موفق عمل نموده است، اما این مدل محدودیت‌هایی نیز دارد که عبارت است از:

۱) خطاهای ورودی داده‌ها: مدل InVEST به شدت به دقت نقشه‌های کاربری اراضی/ پوشش اراضی وابسته است. در این پژوهش، نقشه‌ها از تصاویر لندست تهیه شده‌اند که رزولیشن ۳۰ متری آن‌ها ممکن است جزئیات کوچک (مانند باغ‌های بارانی یا سطوح نفوذپذیر محلی) را نادیده بگیرد.

۲) فرضیات ساده‌سازی‌شده مدل: مدل InVEST بر اساس روش SCS-CN (عدد منحنی) عمل می‌کند که در آن فرضیاتی مانند $\lambda=0/2$ (میزان بارندگی لازم برای شروع رواناب) را اعمال می‌کند. این فرضیات برای مناطق شهری پیچیده مانند تبریز (با رودخانه‌های عبوری و مسیل‌های متعدد) ممکن است دقیق نباشد، زیرا عوامل توپوگرافیکی یا ظرفیت اشباع خاک را به طور کامل در نظر نمی‌گیرد.

۳) عدم حساسیت به تغییرات زمانی و مکانی: مدل InVEST توزیع بارش را یکنواخت فرض می‌کند، در حالی که بارش در تبریز (بر اساس ایستگاه سینوپتیک) ممکن است در مناطق شمالی و جنوبی متفاوت باشد. این امر منجر به خطا در محاسبهٔ حجم نگهداشت رواناب شده، به طوری که در سال ۱۴۰۱ با بارندگی ۴۵ دقیقه‌ای، حجم رواناب جذب و نگهداشته شده ۵/۲۰ میلیون متر مکعب برآورد شده، اما واقعیت ممکن است به دلیل افزایش سطوح غیرقابل نفوذ کمتر از این میزان باشد.

۴) خطاهای محاسباتی و خروجی: خروجی‌های رستری مدل InVEST (مانند نقشه‌های جذب رواناب) ممکن است به دلیل مقیاس پیکسلی، تغییرات فضایی را دقیق نشان ندهد. برای مثال، در مناطق ۹ و ۸ با وسعت کوچک، پتانسیل رواناب پایین‌تر برآورد شده، اما این بیشتر به وسعت محدود این مناطق مربوط است تا ویژگی‌های واقعی، که نشان‌دهندهٔ خطای محاسباتی مکانی مدل است. در کل، محدودیت‌های مدل بیشتر جنبه ورودی و فرضیاتی دارد و مدل در سناریوهای ساده (مانند تمرکز بر خاک) دقیق عمل می‌کند، اما برای کاربری‌های پیچیدهٔ شهری نیاز به کالیبراسیون محلی نیز دارد. بر اساس نتایج پژوهش، پیشنهادهای زیر در دو زمینه کاربرد عملی و تحقیقاتی ارائه می‌شود تا به بهبود مدیریت ریسک سیلاب شهری تبریز و تحقیقات مشابه آتی کمک کند.

پیشنهادهای کاربردی (عملی):

۱) توسعهٔ زیرساخت‌های سبز: با توجه به نقش محدود فضای سبز در جذب رواناب (کمتر از ۶ درصد از کاربری اراضی)، شهرداری تبریز باید برنامه‌هایی برای افزایش فضای سبز شهری (مانند بام‌های سبز، باغ‌های بارانی و روسازی‌های نفوذپذیر) طراحی کرده و اجرا کند. اولویت باید با مناطق پرریسک مانند مناطق ۶، ۵ و ۷ باشد که پتانسیل جذب بالایی دارند، و از اراضی کشاورزی و مراتع اطراف شهر نیز از طریق قوانین سخت‌گیرانه حفاظت به عمل آید.

۲) بهبود سیستم‌های زهکشی ترکیبی: ترکیب اقدامات خاکستری (مانند بهبود شبکه زهکشی) با اقدامات سبز (مانند جنگل‌های شهری) پیشنهاد می‌شود. برای مثال، در مناطق با تراکم مسکونی زیاد (مانند مناطق مرکزی)، نصب سیستم‌های LID[1]می‌تواند ظرفیت جذب را افزایش داده و خسارات اقتصادی را کاهش دهد (مانند اجتناب از ۳۷ میلیون دلار خسارت اجتناب شده ناشی از خدمت اکوسیستمی کاهش ریسک سیلاب شهری تبریز برای سال ۱۴۰۱).

۳) آموزش و آگاهی عمومی: برنامه‌های آموزشی برای شهروندان در مورد اهمیت حفظ مسیل‌ها و رودخانه‌ها (مانند آجی‌چای و قوری‌چای) و جلوگیری از ساخت‌وسازهای غیرمجاز اجرا شود. همچنین، ادغام نتایج مدل InVEST در برنامه‌ریزی شهری تبریز برای شناسایی مناطق پرریسک و تخصیص بودجه برای کاهش میزان ریسک آن.

۴) پایش مداوم و سناریوسازی: ایجاد سیستم پایش مداوم بارش و رواناب واقعی با استفاده از سنسورها در ایستگاه‌های محلی، و شبیه‌سازی سناریوهای آینده (مانند افزایش شهرنشینی) برای پیش‌بینی میزان ریسک.

پیشنهادهای تحقیقاتی:

۱) استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تر: تحقیقات آینده می‌توانند مدل InVEST را با مدل‌های یادگیری ماشین (مانند MaxEnt یا SVM) ترکیب کنند تا دقت ارزیابی میزان ریسک افزایش یابد. همچنین، بررسی سناریوهای تغییرات آب‌وهوایی (مانند SSP) برای پیش‌بینی میزان ریسک تا سال ۲۰۵۰.

۲) توسعهٔ زمانی و مکانی: پژوهش‌های آتی با استفاده از دوره‌های زمانی بیشتر (از سال ۱۴۰۱ به بعد) انجام شده و نتیجهٔ آن با سایر کلان‌شهرها (مانند تهران یا اصفهان) مقایسه شود. همچنین، در نظر گرفتن عوامل انسانی مانند مهاجرت و رشد جمعیت در این زمینه.

۳) بهبود داده‌ها و کالیبراسیون: تحقیقات آتی از داده‌های میدانی دقیق (مانند نمونه‌برداری خاک) و تصاویر ماهواره‌ای با رزولیشن بالاتر (مانند Sentinel) استفاده کنند. کالیبراسیون مدل InVEST با داده‌های محلی تبریز برای کاهش خطاهای کاربری اراضی پیشنهاد می‌شود.

۴) ارزیابی اقتصادی دقیق‌تر: بررسی روش‌های ارزش‌گذاری جایگزین (مانند هزینه جایگزینی) و ادغام عوامل تورم محلی برای برآورد دقیق‌تر منافع ناشی از خدمات اکوسیستمی.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

Ahiablame, L., & Shakya, R. (2016). Modeling flood reduction effects of low impact development at a watershed scale. *Journal of Environmental Management, 171*, 81-91. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.036

Ahmadi, Y., Bazrafshan, O. B., Salajeghe, A., Holisaz, A., & Azare, A. (2021). Risk analysis of urban flood in Bandar Abbas using Machine Learning model and Analytic Hierarchy Process, *Journal of Environmental Erosion Research*, *11*(1), 36-57. [In Persian] https://doi.org/10.52547/jeer.11.1.36

Alderman, K., Turner, L. R., & Tong, S. (2012). Floods and human health: a systematic review. *Environment International, 47*, 37-47. https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.06.003

1- Low Impact Development

Bose, S., & Mazumdar, A. (2023). Urban flood risk assessment and mitigation with InVEST-UFRM model: a case study on Kolkata city, West Bengal state (India). *Arabian Journal of Geosciences, 16*(5), 320. https://doi.org/10.1007/s12517-023-11486-y

Dai, K., Cheng, C., Shen, S., Geng, J., & Zhang, T. (2024). Evaluating future flood risk mitigation capacities in major cities across China. *Urban Climate, 55*, 101890. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101890

Ekmekcioğlu, Ö., Koc, K., & Özger, M. (2021). District based flood risk assessment in Istanbul using fuzzy analytical hierarchy process. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 35*, 617-637. https://doi.org/10.1007/s00477-020-01924-8

Farahnakian, Z., Ghazavi, R., Dokhan, S., & Omidvar, E. (2024). Investigating the effect of climate change on temperature, rainfall, and intensity-duration-frequency curves in dry areas (case study: Kashan Watershed). *Journal of Water and Soil Management and Modelling, 4*(2), 211-226. [In Persian] https://doi.org/10.22098/mmws.2023.12570.1254

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., ... & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more–The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban water journal, 12*(7), 525-542. https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314

Fotouhi, S., & Kiani, S. (2015). Micro-zonation of the Urban Flood Risk Model Using AHP (Case Study: Nahavand city). *Quarterly Journal of Environmental-based Territorial Planning, 8*(29), 133-152. [In Persian] https://journals.iau.ir/article_515572.html

Ghadbeygi, M., Mazaheri, H., Shafiei, H., & Mardian, M. (2024). Urban flood risk management, a solution for the protection of ecosystems (Case study: Arak City). *Journal of Research in Ethnobiology and Conservation, 1*(2), 38-50. [In Persian] https://doi.org/10.22091/ETHC.2024.10558.1018

Ghahraman, B., & Abkhezr, H. (2004). Improvement in Intensity-Duration-Frequency Relationships of Rainfall in Iran. *Journal of Water and Soil Science, 8*(2), 1-14. [In Persian] https://doi.org/20.1001.1.24763594.1383.8.2.1.4

Gitika, T., & Ranjan, S. (2014). Estimation of surface runoff using NRCS curve number procedure in Buriganga Watershed, Assam, India-a geospatial approach. *International Research Journal of Earth Sciences, 2*(5), 1-7. https://www.isca.in/EARTH_SCI/Archive/v2/i5/1.ISCA-IRJES-2014-011.php

Gu, X., & Liu, X. (2024). Planning scale flood risk assessment and prediction in ultra-high density urban environments: The case of Hong Kong. *Ecological Indicators, 162*, 112000. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112000

Hou, J., Liu, F., Tong, Y., Guo, K., Ma, L., & Li, D. (2020). Numerical simulation for runoff regulation in rain garden using 2D hydrodynamic model. *Ecological Engineering, 153*, 105794. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105794

Kuller, M., Farrelly, M., Deletic, A., & Bach, P. M. (2018). Building effective Planning Support Systems for green urban water infrastructure—Practitioners' perceptions. *Environmental Science & Policy, 89*, 153-162. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.06.011

Liang, C. Y., You, G. J. Y., & Lee, H. Y. (2019). Investigating the effectiveness and optimal spatial arrangement of low-impact development facilities. *Journal of Hydrology, 577*, 124008. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124008

Ma, Y., Deilami, K., Egodawatta, P., Liu, A., McGree, J., & Goonetilleke, A. (2019). Creating a hierarchy of hazard control for urban stormwater management. *Environmental Pollution, 255*, 113217. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113217

MahmoodZadeh, H., Emami Kia, V., & Rasooli, A. A. (2015). Micro Zonation of Flood Risk in Tabriz Suburb with using Analytical Hierarchy Process. *Journal of Geographical Research, 30*(1), 167-180. [In Persian] https://jgr.ui.ac.ir/article_18098.html?

Peng, J., & Zhang, J. (2022). Urban flooding risk assessment based on GIS-game theory combination weight: A case study of Zhengzhou City. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 77*, 103080. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103080

Pham, B. T., Luu, C., Van Phong, T., Nguyen, H. D., Van Le, H., Tran, T. Q., ... & Prakash, I. (2021). Flood risk assessment using hybrid artificial intelligence models integrated with multi-criteria decision analysis in Quang Nam Province, Vietnam. *Journal of Hydrology, 592*, 125815. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125815

Prudencio, L., & Null, S. E. (2018). Stormwater management and ecosystem services: A review. *Environmental Research Letters, 13*(3), 033002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa81a

Pyke, C., Warren, M. P., Johnson, T., LaGro Jr, J., Scharfenberg, J., Groth, P., ... & Main, E. (2011). Assessment of low impact development for managing stormwater with changing precipitation due to climate change. *Landscape and Urban Planning, 103*(2), 166-173. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.07.006

Qi, W., Ma, C., Xu, H., Chen, Z., Zhao, K., & Han, H. (2021). A review on applications of urban flood models in flood mitigation strategies. *Natural Hazards, 108*, 31-62 . https://doi.org/10.1007/s11069-021-04715-8

Qin, H. P., Li, Z. X., & Fu, G. (2013). The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *Journal of Environmental Management, 129*, 577-585. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.026

Rentschler, J., Avner, P., Marconcini, M., Su, R., Strano, E., Vousdoukas, M., & Hallegatte, S. (2023). Global evidence of rapid urban growth in flood zones since 1985. *Nature, 622*(7981), 87-92. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06468-9

Row, S. (1976). *Appendix I : USDA / SCS curve number method for estimating daily runoff*, 88–90.

Rözer, V., Mehryar, S., & Surminski, S. (2022). From managing risk to increasing resilience: a review on the development of urban flood resilience, its assessment and the implications for decision making. *Environmental Research Letters, 17*(12), 123006 . https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca8bc

Rufat, S., & Botzen, W. W. (2022). Drivers and dimensions of flood risk perceptions: Revealing an implicit selection bias and lessons for communication policies. *Global Environmental Change, 73*, 102465 . https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102465

Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., Arkema, K., Bernhardt, J., Bierbower, W., ... & Wyatt, K. (2020). SDR: Sediment Delivery Ratio—InVEST documentation. *InVEST, 3*(2). https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest/3.9.0/userguide/index.html

Sohn, W., Kim, J. H., Li, M. H., & Brown, R. (2019). The influence of climate on the effectiveness of low impact development: A systematic review. *Journal of Environmental Management, 236*, 365-379. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.041

Soomro, A. G., Babar, M. M., Memon, A. H., Zaidi, A. Z., Ashraf, A., & Lund, J. (2019). Sensitivity of direct runoff to curve number using the SCS-CN method. *Civil Engineering Journal, 5*(12), 2738-2746. https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091445

Tabeyi, N., Babaee Aghdam, F., & Hakimi, H. (2022). Inclusive city; A new approach in urban planning A case study the Tabriz city. *Journal of Geographical Urban Planning Research, 10*(2), 115-132. [In Persian] https://doi.org/ 10.22059/JURBANGEO.2022.335543.1627

Tellman, B., Sullivan, J. A., Kuhn, C., Kettner, A. J., Doyle, C. S., Brakenridge, G. R., ... & Slayback, D. A. (2021). Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature, 596*(7870), 80-86 . https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w

Tessema, S. M., Lyon, S. W., Setegn, S. G., & Mörtberg, U. (2014). Effects of different retention parameter estimation methods on the prediction of surface runoff using the SCS curve number method. *Water Resources Management, 28*, 3241-3254. https://doi.org/10.1007/s11269-014-0674-3

UN Office for Disaster Risk Reduction. (2020). *Human cost of disasters. An overview of the last 20 years 2000-2019.* UN.

Vilca-Campana, K., Carrasco-Valencia, L., Iruri-Ramos, C., Cárdenas-Pillco, B., Escudero, A., & Chanove-Manrique, A. (2024). *An Ecosystem Service Evaluation for Urban Flood Mitigation in a Desert Region Using the Invest Model*. Available at SSRN 4885367. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4885367

Wang, Y., Peng, L., Yang, L. E., Wang, Z., & Deng, X. (2024). Attributing effects of classified infrastructure management on mitigating urban flood risks: A case study in Beijing, China. *Sustainable Cities and Society*, *101*, 105141 .https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105141

Wu, M., Wei, X., Ge, W., Chen, G., Zheng, D., Zhao, Y., ... & Xin, Y. (2024). Analyzing the spatial scale effects of urban elements on urban flooding based on multiscale geographically weighted regression. *Journal of Hydrology*, 132178. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132178

Yazdani, M. H., Ghasemi, M., & Saleki Maleki, M. A. (2018). Micro-zoning vulnerability of cities against flood risk (case study: Tabriz city). *Journal of Rescue and Relief*, *10*(4), 33-44. [In Persian] http://jorar.ir/article-1-355-en.html

Zeng, S., Guo, H., & Dong, X. (2019). Understanding the synergistic effect between LID facility and drainage network: With a comprehensive perspective. *Journal of Environmental Management*, *246*, 849-859. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.028

Zeynali Azim, A., Hatami Golzari, E., Karami, I., & Babazadeh Oskoui, S. (2021). Measuring the Environmental Sustainability of Tabriz City Based on Environmental Indicators of Smart Urban Growth. *Journal of Sustainability, Development & Environment*, *2*(3), 41-59. [In Persian] https://sanad.iau.ir/Journal/jsde/Article/846581/FullText

Zischg, J., Goncalves, M. L., Bacchin, T. K., Leonhardt, G., Viklander, M., Van Timmeren, A., ... & Sitzenfrei, R. (2017). Info-Gap robustness pathway method for transitioning of urban drainage systems under deep uncertainties. *Water Science and Technology*, *76*(5), 1272-1281. https://doi.org/10.2166/wst.2017.320

Vol.14, No.4, Winter 2025, p. 181-200 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94757.1600 OPEN ACCESS

Assessing the Role of Smart Cities in Enhancing Urban Resilience against Environmental Hazards (Case Study: Zanjan City)

Hossein Tahmasebi Moghaddam [1]*, Zahra Rasoulzadeh [2]

[1&2] Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 23 July 2025

Revised: 03 October 2025

Accepted: 08 October 2025

Available Online: 08 October 2025

Keywords:

Smart Cities

Urban Resilience

Environmental Hazards

Sustainable Urban Development

Smart Transportation Zanjan

ABSTRACT

With the expansion of urbanization and the intensification of environmental hazards, urban resilience has emerged as a key strategy for crisis management and sustainable urban development. At the same time, the concept of the smart city, grounded in advanced technologies, offers a promising framework for enhancing resilience against both natural and human-induced hazards. This study aims to analyze the role of smart city components in improving urban resilience in the city of Zanjan. The research adopts a mixed-methods approach. In the qualitative phase, key components were identified through theoretical analysis and validated using the Delphi method. In the quantitative phase, structural equation modeling (SEM) was conducted using PLS software to examine the impact of the identified components on urban resilience. The results indicate that all dimensions of the smart city have a significant positive impact on urban resilience. Among them, smart transportation, data management and analytics, and smart infrastructure had the strongest impact. The overall coefficient of the smart city's impact on urban resilience was calculated at 0.8846, highlighting the strong potential of this variable in enhancing Zanjan's resilience capacity. Therefore, the findings underscore the importance of integrating advanced technologies into the policy and development programs of Zanjan, suggesting that the smart city can play a crucial role in shaping a resilient, adaptive, and sustainable urban future.

* Corresponding author: Hossein Tahmasebi Moghaddam E-mail address: Tahmasebihossein@znu.ac.ir

How to cite this article: Tahmasebi Moghaddam, H., & Rasoulzadeh, Z. (2025). Assessing the Role of Smart Cities in Enhancing Urban Resilience against Environmental Hazards (Case Study: Zanjan City). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 14*(4), 181-200. https://doi.org/10.22067/GEOEH.2025.94757.1600

©2025 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

In the contemporary era, alongside the accelerating trend of urbanization and the intensification of climatic hazards, cities face increasingly complex challenges in sustainability and crisis management. Zanjan, as one of Iran's developing urban centers, is no exception and contends with issues such as flash floods, drought, land subsidence, and weaknesses in smart infrastructure. Under such circumstances, the concept of "urban resilience," which entails a city's capacity to confront, adapt to, and recover from crises, gains heightened importance. In this context, the emerging paradigm of the "smart city," leveraging technologies such as the Internet of Things, big data, artificial intelligence, and advanced communication infrastructures, has been introduced as an effective tool to enhance urban resilience. The present study aims to investigate and elucidate the role of smart city components in strengthening the various dimensions of urban resilience in Zanjan against environmental hazards.

Material and Methods

This study adopts an applied research design with a mixed qualitative-quantitative approach. In the qualitative phase, through a review of theoretical and empirical foundations, the relevant components and subcomponents related to smart cities and urban resilience were identified. Subsequently, in the quantitative phase, to measure expert opinions and build consensus on selected indicators, a two-round Delphi method was employed with the participation of 35 specialists. For data analysis, statistical tests including mean, standard deviation, Kendall's coefficient of concordance, and Chi-square test were applied. Furthermore, to evaluate the conceptual framework of the study and examine causal relationships among variables, Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) and Confirmatory Factor Analysis (CFA) were utilized. The reliability of the questionnaires was confirmed by Cronbach's alpha coefficients exceeding 0.7, and model fit was validated using indices such as SRMR, NFI, and d_ULS.

Results and Discussion

The findings indicated that out of an initial 48 indicators, 42 were confirmed by expert consensus and incorporated into subsequent analyses. In the factor analysis, all items exhibited factor loadings above 0.7, demonstrating the model's high structural validity. Various smart city components (including smart transportation, data management and analytics, smart community, smart infrastructure, smart crisis management, and smart economy) each showed significant positive effects on different dimensions of urban resilience. Path analysis revealed that the greatest direct effect belonged to the smart transportation component with a path coefficient of 0.349 and a t-value of 8.64. This was followed by data management and analytics ($\beta = 0.3081$), smart community ($\beta = 0.1855$), smart crisis management ($\beta = 0.1892$), smart infrastructure ($\beta = 0.1789$), and smart economy ($\beta = 0.1740$), all of which had meaningful impacts on urban resilience. Overall, the total effect coefficient of the smart city on the resilience of Zanjan city was calculated as 0.8846, indicating a strong and direct relationship between these variables. The four dimensions of urban resilience (social, economic, institutional, and infrastructural) were well explained by the smart city components. Smart infrastructure played a crucial role in enhancing the city's physical robustness; smart community contributed to raising awareness, participation, and digital literacy among citizens; smart data management and analytics optimized institutional decision-making; and the smart economy supported the city's economic sustainability during crises. These results underscore that institutionalizing smart technologies within Zanjan's urban structures can significantly improve the city's resilience against environmental threats.

Conclusion

In summary, the study's findings emphasize that urban development in the twenty-first century necessitates the intelligent integration of technology with sustainable governance. The results of this research can serve as a practical model for policymakers, urban planners, and crisis managers aiming to enhance urban resilience by leveraging smart city capacities. It is also recommended to take effective steps

toward transforming Zanjan into a resilient and smart city through the expansion of digital infrastructure, enhancement of data literacy, and strengthening of a knowledge-based economy. Continuation of this trajectory requires multi-sectoral collaboration among government agencies, the private sector, universities, and civil society to prepare adequately for complex and forthcoming challenges.

Acknowledgements

With the utmost respect and gratitude, we deem it our duty to express our sincere appreciation to all those who assisted us in the completion of this research. We extend our heartfelt thanks to the institutions and organizations that, by providing the necessary data and information, created the conditions for conducting this study with greater accuracy. We earnestly wish continued success and prosperity for all esteemed individuals from the Almighty.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره۴ ، زمستان ۱۴۰۴ ، ص۲۰۰-۱۸۱

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94757.1600 دسترسی آزاد

بررسی نقش شهر هوشمند در ارتقای تاب‌آوری شهری در برابر مخاطرات محیطی (مطالعهٔ موردی: شهر زنجان)

حسین طهماسبی مقدم [۱*]، زهرا رسول‌زاده [۲]

[۱و۲] گروه جغرافیا، دانشکدهٔ علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۶

کلمات کلیدی:

شهرهای هوشمند

تاب‌آوری شهری

مخاطرات محیطی

توسعه پایدار شهری

حمل‌ونقل هوشمند

زنجان

چکیده

با توجه به گسترش شهرنشینی و شدت یافتن مخاطرات محیطی، تاب‌آوری شهری به‌عنوان راهبردی کلان برای مدیریت بحران و پایداری شهری مطرح شده است. هم‌زمان، مفهوم شهر هوشمند با تکیه بر فناوری‌های نوین، بستری مناسب برای ارتقای تاب‌آوری در برابر مخاطرات طبیعی و انسانی فراهم می‌آورد. پژوهش حاضر با هدف تحلیل نقش مؤلفه‌های شهر هوشمند در ارتقای تاب‌آوری شهری در شهر زنجان انجام شده است. روش تحقیق از نوع ترکیبی کیفی-کمّی است؛ در بخش کیفی، مؤلفه‌های کلیدی از طریق تحلیل نظری استخراج و با استفاده از روش دلفی اعتبارسنجی شد. سپس در بخش کمّی، مدل‌یابی معادلات ساختاری با نرم‌افزار PLS جهت تحلیل اثرات مؤلفه‌های شناسایی‌شده بر تاب‌آوری شهری صورت گرفت. نتایج نشان داد که همهٔ ابعاد شهر هوشمند اثر مثبت و معناداری بر تاب‌آوری شهری دارند. در این میان، حمل‌ونقل هوشمند، مدیریت داده و تحلیل و زیرساخت‌های هوشمند بیشترین اثرگذاری را داشتند. ضریب کلی تأثیر شهر هوشمند بر تاب‌آوری شهری برابر با ۰/۸۸۴۶ به دست آمد که بیانگر قدرت بالای این متغیر در افزایش ظرفیت‌های تاب‌آوری شهر زنجان است؛ بنابراین یافته‌ها بر اهمیت تلفیق فناوری‌های نوین با سیاست‌گذاری و برنامه‌های توسعه شهر زنجان تأکید دارد و نشان می‌دهد که شهر هوشمند می‌تواند نقشی اساسی در ایجاد شهری مقاوم، سازگار و پایدار آن ایفا کند.

مقدمه

جهان معاصر با دو روند موازی و تعیین‌کننده شهرنشینی شتابان و تغییرات اقلیمی روبه‌روست. بر اساس گزارش سازمان ملل متحد تا سال ۲۰۵۰ نزدیک به ۷۰ درصد از جمعیت جهان در شهرها ساکن خواهند بود (United Nations, 2022). این تراکم بالای جمعیت و زیرساخت، ضمن تبدیل شهرها به موتورهای رشد اقتصادی، آن‌ها را به کانون‌های اصلی آسیب‌پذیری در برابر مخاطرات

* نویسندهٔ مسئول: حسین طهماسبی مقدم E-mail:Tahmasebihossein@znu.ac.ir

محیطی بدل ساخته است (Un-Habitat, 2022; Lall & Deichmann, 2012). گزارش هیئت بین دولتی تغییر اقلیم[1] به‌وضوح نشان می‌دهد که فراوانی و شدت پدیده‌هایی مانند سیلاب‌های ناگهانی، دوره‌های خشکسالی طولانی‌مدت و امواج گرمای کشنده در حال افزایش است و امنیت، اقتصاد و سلامت جوامع شهری را مستقیماً تهدید می‌کند (IPCC, 2022). این بحران‌ها نشان می‌دهند که رویکردهای سنتی مدیریت بحران که صرفاً بر واکنش پس از وقوع حادثه متمرکز بودند، دیگر کارایی لازم را ندارند.

در پاسخ به این چالش، مفهوم «تاب‌آوری» به‌عنوان یک رویکرد راهبردی و پیشگیرانه مطرح شده است. مفهوم تاب‌آوری، ریشه در علوم طبیعی و بوم‌شناسی دارد و نخستین بار توسط هالینگ (Holling, 1973) در توصیف توانایی یک اکوسیستم برای بازگشت به تعادل پس از اختلال معرفی شد. با گذر زمان، این مفهوم به حوزه‌های مدیریت شهری، برنامه‌ریزی، مهندسی، علوم اجتماعی و سیاست‌گذاری نیز وارد شد و دارای تعاریف متعدد و متفاوتی است (Tahmasebi Moghaddam, Ahadnejad Reveshty, Heydari & Shoghli, 2021). در حوزهٔ مطالعات شهری، تاب‌آوری شهری به توانایی یک شهر در جذب، مقابله، بازیابی و سازگاری با شوک‌های ناگهانی (مانند زلزله، سیل، آتش‌سوزی) و فشارهای مزمن (مانند تغییر اقلیم، آلودگی، فقر و فرسودگی زیرساخت‌ها) اطلاق می‌شود (Ahern, 2011)، تاب‌آوری صرفاً به معنای مقاومت یا بازگشت به حالت اولیه نیست، بلکه به ظرفیت یک سیستم شهری برای جذب شوک‌ها، انطباق با تغییرات و تحول به سمت وضعیتی پایدارتر و کارآمدتر اطلاق می‌شود (Meerow, Newell & Stults, 2016). این مفهوم امروزه نه تنها بر بازگشت به وضعیت قبل از بحران، بلکه بر یادگیری، نوآوری و تحول پایدار در پاسخ به بحران تأکید دارد (Davoudi et al., 2012). تاب‌آوری شهری یک پدیده چندبُعدی است و صرفاً محدود به زیرساخت‌ها یا محیط‌زیست نیست. بسیاری از پژوهشگران، ابعاد تاب‌آوری کالبدی، اجتماعی، اقتصادی و نهادی را برای تاب‌آوری شهری برشمرده‌اند (Sharifi, 2016) و دستیابی به آن نیازمند یک نگرش کل‌نگر و یکپارچه است که بتواند پیچیدگی‌های سیستم شهری را درک و مدیریت کند (Cutter et al., 2008) و در همین بستر، پارادایم «شهر هوشمند» به عنوان یکی از امیدبخش‌ترین راهکارها برای مواجهه با چالش‌های شهری قرن بیست و یکم ظهور کرده است. شهر هوشمند با تکیه بر ستون‌های فناوری مانند اینترنت اشیاء، تحلیل داده‌های بزرگ[2]، هوش مصنوعی[3] و زیرساخت‌های ارتباطی نسل جدید، به دنبال ایجاد یک سیستم عصبی دیجیتال برای شهر است (Albino, Berardi & Dangelico, 2015). این سیستم می‌تواند از طریق جمع‌آوری و تحلیل داده‌های لحظه‌ای، درک عمیق‌تری از پویایی‌های شهری فراهم کرده و به مدیریت بهینه منابع و خدمات منجر شود. شهر هوشمند ظرفیت بالایی برای بهبود چرخه مدیریت بحران و تاب‌آوری شهری دارد. در مرحله پیشگیری، حسگرهای اینترنت اشیا در زیرساخت‌های شهری داده‌هایی را برای هشدارهای سریع فراهم می‌کنند (Zheng, 2019) و مدل‌های هوش مصنوعی با تحلیل داده‌های محیطی، مناطق پرخطر را پیش‌بینی و مسیرهای تخلیه را بهینه می‌کنند (Li et al., 2022). در زمان واکنش به بحران، پلتفرم‌های هوشمند با تجمیع داده‌ها از منابع مختلف مانند پهپادها و اپلیکیشن‌ها، تصویری جامع برای تصمیم‌گیری سریع و دقیق فراهم می‌کنند (Yigitcanlar et al., 2020). همچنین در مرحله بازیابی، داده‌کاوی از تصاویر ماهواره‌ای و پهپادها به ارزیابی خسارات و اولویت‌بندی بازسازی کمک می‌کند.

در دهه‌های اخیر رشد سریع شهرنشینی، شهرهای ایران را به کانون‌های تمرکز جمعیت، زیرساخت و فعالیت‌های اقتصادی تبدیل کرده که درعین‌حال در معرض تهدیدات فزاینده‌ای چون سیلاب، خشکسالی، فرونشست زمین، آلودگی هوا و امواج گرما نیز قرار دارند و شهر زنجان به‌عنوان یکی از شهرهای متوسط با روند رشد فزاینده جمعیت و توسعه کالبدی، در معرض چالش‌های نوظهوری ناشی از دو روند جهانی یعنی شهرنشینی شتابان و تغییرات اقلیمی قرارگرفته است. افزایش ساخت‌وساز در حریم رودخانه‌ها، گسترش بی‌رویه شهر در مناطق پرخطر، ضعف در سیستم هشدار سریع و زیرساخت‌های فرسوده، آسیب‌پذیری شهر زنجان را در برابر بحران‌هایی مانند سیلاب‌های ناگهانی، دوره‌های خشکسالی و امواج گرمایی و غیره تشدید کرده است و شهر زنجان به‌عنوان یکی از

1- IPCC
2- Big Data
3- AI

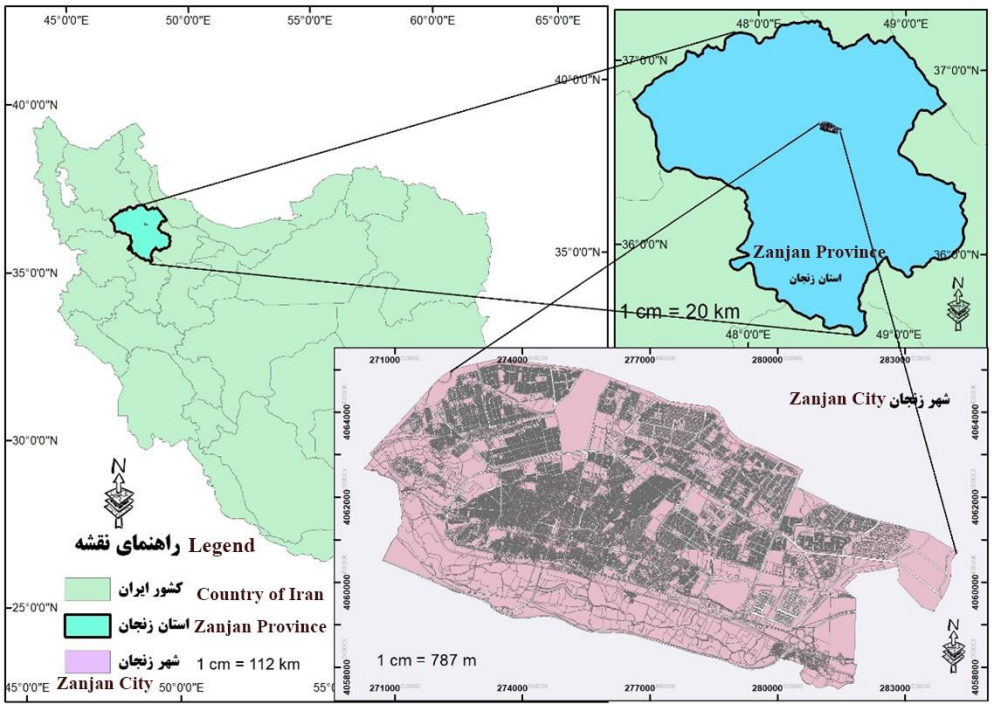
شهرهای در حال توسعهٔ ایران، به‌ویژه با فقدان سیستم‌های نوین پایش و مدیریت بحران، با تهدیدهای مستقیم زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی مواجه هستند.

مطالعات متعددی در سطح بین‌المللی به بررسی ارتباط میان فناوری‌های هوشمند و تاب‌آوری شهری پرداخته‌اند. برای مثال، بتی و همکاران (Batty et al., 2012) با بررسی آیندهٔ شهرهای هوشمند تأکید کرده‌اند که استفاده از داده‌های بلادرنگ، اینترنت اشیا و سیستم‌های هشدار سریع می‌تواند به شکل‌گیری شهرهایی با قدرت واکنش سریع در برابر بحران‌ها کمک کند. در مطالعه‌ای دیگر، ژو و وانگ (Zhou & Wang, 2020) نقش فناوری‌های هوشمند در مقابله با بحران کرونا و همچنین ارتقای تاب‌آوری اجتماعی و نهادی شهرها را بررسی کرده‌اند. ییگیت‌کانلار و همکاران (Yigitcanlar et al., 2020) نیز با تحلیل سیستماتیک پژوهش‌های حوزه شهر هوشمند، تأکید کرده‌اند که شهرهای هوشمند در صورتی می‌توانند پایدار و تاب‌آور باشند که فناوری به‌درستی در ساختارهای مدیریتی و اجتماعی نهادینه شود. در ایران نیز، پژوهش‌های مختلفی انجام شده که هر یک به بخشی از این رابطه پرداخته‌اند: قریشی و همکاران (Ghoreishi, Parsi & Nourian, 2020) در پژوهشی با عنوان «تحلیلی بر قلمرو نظری شهر هوشمند تاب آور و تدوین چارچوب کاربست آن» به این نتیجه رسیدند که سه گونهٔ اصلی مطالعهٔ تبیینی شهر هوشمند تاب آور وجود دارد که از حیث پیوند شناختی، ارتباط عناصر، ابعاد و مؤلفه‌های دو نظریه کمتر کار شده و جامعیت تلفیقی یک نظریه واحد زیر سؤال است. پیشنهاد روشنی برای تلفیق جامعی از دو نظریه برای تعیین چارچوب نظری در تدوین سازوکار یک شهر هوشمند تاب‌آور ارائه کردند. شاهیوندی و پورحسن‌زاده (Shahivandi & Pourhasanzadeh, 2023) در پژوهشی با عنوان «تبیین مؤلفه‌ها و شاخص‌های مؤثر شهر هوشمند بر ارتقاء تاب‌آوری شهری در برابر کووید-۱۹ مطالعهٔ موردی؛ شهر شیراز» به این نتیجه رسیدند هر چهار مؤلفهٔ مؤثر شهر هوشمند یعنی دسترسی به خدمات، نهادی - مدیریتی، اقتصادی و اجتماعی - فرهنگی دارای ارتباط معناداری با تاب‌آوری شهری در برابر کووید-۱۹ هستند. فتوحی و همکاران (Fotouhi, Hosseinian Rad & Yazdani, 2025) در مقاله‌ای با عنوان «بررسی تأثیرات ابعاد هوشمند سازی بر تاب‌آوری شهری در خرم‌آباد» به این نتیجه رسیدند که میزان تأثیرگذاری هر یک از ابعاد اجتماعی - اقتصادی؛ کالبدی - محیطی و مدیریتی بر تاب‌آوری شهری به‌مراتب بیشتر است. این نتایج نشان می‌دهد که هر یک از ابعاد مورد مطالعه تأثیر مثبت و معناداری بر تاب‌آوری شهری خرم‌آباد دارد؛ بنابراین پژوهش حاضر از چند جهت با مطالعات پیشین تفاوت دارد. نخست این تحقیق به‌صورت خاص شهر زنجان را به‌عنوان نمونه‌ای کمتر مطالعه شده مورد بررسی قرار می‌دهد. دوم آن‌که این پژوهش با رویکردی تلفیقی، به دنبال تحلیل هم‌زمان مؤلفه‌های شهر هوشمند و تاب‌آوری شهری است و سعی دارد پیوندی نظام‌مند میان این دو مفهوم برقرار کند؛ در نتیجه این تحقیق در یک چارچوب تحلیلی، هدف ارزیابی و تبیین نقش مؤلفه‌های مختلف شهر هوشمند در تقویت ابعاد گوناگون تاب‌آوری شهر زنجان است و این پژوهش به دنبال پاسخ به این پرسش است که مهم‌ترین مؤلفه‌های شهر هوشمند به سمت یک راهبرد جامع «شهر تاب‌آور هوشمند» کدام است؟

منطقهٔ مورد مطالعه

شهر زنجان به‌عنوان اولین و بزرگ‌ترین نقطهٔ شهری استان و شهرستان زنجان، یکی از شهرهای میانی کشور در ردهٔ جمعیتی ۲۵۰ تا ۵۰۰ هزار نفری و مرکز سیاسی، اداری استان محسوب می‌شود. این شهر در فاصلهٔ ۳۳۰ کیلومتری تهران و ۲۹۳ کیلومتری تبریز واقع شده است. موقعیت جغرافیایی شهر منطبق بر ۱۴ دقیقه و ۴۸ درجه الی ۴۴ دقیقه و ۴۸ درجه طول شرقی و ۳۴ دقیقه و ۳۶ درجه الی ۴۸ دقیقه و ۳۶ درجه عرض شمالی می‌باشد که در مجموعه‌ای از ارتفاعات از طرف شمال، شمال شرق، جنوب و جنوب غرب و در ارتفاع متوسط ۱۶۶۰ متر از سطح دریا واقع گردیده است (شکل ۱). موقعیت زمین‌شناسی شهر زنجان و قرارگیری آن در مجاورت گسل شمالی، احتمال وقوع زمین‌لرزه‌های شدید را افزایش داده است. تجربه دو زمین‌لرزه در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۴، به‌ویژه زلزله ۶ ریشتری سال ۱۳۸۴ که خسارت‌های جدی بر منازل مسکونی و زیرساخت‌های شهری وارد نمود، مؤید آسیب‌پذیری بالای این پهنهٔ شهری در برابر زمین‌لرزه است.

افزون بر این، وجود مسیل‌های اصلی همچون گاوازنگ، دو اسب و پایین‌کوه که رواناب‌های شمالی شهر را به سمت مناطق جنوبی هدایت می‌کنند، همراه با مسیل‌های فرعی متعدد، خطر وقوع سیلاب و آب‌گرفتگی را تشدید می‌کند (Tahmasebi Moghadam, Heydari, Alibakshi & Rasoulzadeh, 2025). از سوی دیگر، شهر زنجان در معرض مخاطرات بیولوژیکی و بهداشتی نیز قرار دارد. همه‌گیری کووید -۱۹ در سال ۲۰۱۹ نمونه‌ای بارز از تهدیدهای زیستی بود که به‌طور مستقیم بر سلامت عمومی، پویایی اجتماعی و عملکرد اقتصادی شهر تأثیر گذاشت (Tahmasebi Moghaddam et al., 2021).



شکل ۱– نقشهٔ محدودهٔ مورد مطالعه در تقسیمات سیاسی استانی و کشوری

Fig. 1. Map of the study area within provincial and national administrative divisions

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نظر هدف از نوع کاربردی و از نظر ماهیت و روش تحقیق از نوع ترکیبی کیفی-کمّی است. بخش کیفی شامل شناسایی مؤلفه‌های مؤثر شهر هوشمند بر ارتقای تاب‌آوری شهر زنجان در برابر مخاطرات محیطی از طریق بررسی مبانی نظری و تئوریک پژوهش می‌باشد (جدول ۱) و برای ارزیابی نقش مؤلفه‌های شهر هوشمند در ارتقای تاب‌آوری شهر زنجان در برابر مخاطرات محیطی با استفاده از مطالعات میدانی و استفاده از نظرات اساتید و کارشناسان در حوزه محیط‌زیست، برنامه‌ریزی شهری، مخاطرات محیطی و فناوری و اطلاعات مربوطه جمع‌آوری و سپس به‌صورت پرسشنامه در قالب روش دلفی در نرم‌افزار SPSS موردبررسی قرار گرفت. اعضای پانل خبرگان ۳۵ نفر قرار داده شده‌اند و از آن‌ها خواسته شده تا با استفاده از طریق متغیرهای کلامی نظر خود را در مورد هرکدام از متغیرها اعمال نمایند. در بخش کمّی با استفاده از مدل تحلیل معادلات ساختاری و روش تحلیل مسیر در نرم‌افزار PLS نوع مؤلفه‌ها با توجه به اثرگذاری و اثرپذیری بر سایر مؤلفه‌ها مشخص‌شده است. جهت بررسی روایی و پایایی پرسشنامه در این پژوهش از دو روش اعتبار پرسشنامه با استفاده از دو روش صوری و اعتبار سازه (عاملی) به‌منظور ارزیابی قابلیت اعتماد پرسشنامه از

آزمون آلفای کرونباخ استفاده‌شده است که نتایج حاکی از آن است که پرسشنامه از پایایی بالا برخوردار است. آلفای کرونباخ برای دو ساختار از ۰/۷ بالاتر است که بالاتر از ۰/۵ می‌باشد. در نتیجه از روایی همگرا برخوردار است.

جدول ۱- مؤلفه‌های اصلی و زیر مؤلفه‌های شهر هوشمند و تاب‌آوری شهری

Table 1 – Main Components and Subcomponents of Smart City and Urban Resilience

معیارهای شهر هوشمند Smart City Criteria		
معیارها Criteria	**زیر معیارها** Sub-Criteria	**منابع** Sources
زیرساخت‌های هوشمند (ST) Smart Infrastructure	۱. اینترنت اشیاء، ۲. حسگرهای محیطی، ۳. شبکه‌های هوشمند برق، ۴. اینترنت پرسرعت پایدار، ۵. ساختمان‌های هوشمند ۶. شبکه هوشمند آب ۷. مدیریت هوشمند پسماند، ۸. پایش کیفیت هوا، ۹. کنترل خودکار فشار و جریان 1. Internet of Things (IoT)2. Environmental Sensors 3. Smart Power Grids 4. Reliable High-Speed Internet 5. Smart Buildings 6. Smart Water Networks 7. Smart Waste Management 8. Air Quality Monitoring 9. Automated Pressure and Flow Control	Bibri & Krogstie, 2017; Albino et al., 2015; ISO 37122, 2019 UNECE, 2022
مدیریت داده و تحلیل (M) Data Management and Analytics	۱. سامانه‌های کلان داده (Big Data)۲. استفاده از هوش مصنوعی در تحلیل ریسک ۳. سیستم‌های تصمیم‌یار (DSS) ۴. داشبوردهای مدیریتی ۵. استفاده از GIS و RS ۶. استخراج الگوهای رفتاری از داده‌ها 1. Big Data Systems 2. Application of Artificial Intelligence in Risk Analysis 3. Decision Support Systems (DSS) 4. Management Dashboards 5. Use of GIS and Remote Sensing (RS) 6. Behavioral Pattern Extraction from Data	Sharifi, 2016; Batty et al., 2012;
اجتماع هوشمند(S) Smart Community	۱.اپلیکیشن‌های شهروندگرا، ۲. پلتفرم گزارش خرابی و بحران، ۳. رأی‌گیری الکترونیکی، ۴. شبکه‌های اجتماعی هوشمند، ۵. پلتفرم گفت‌وگو با مدیریت شهری ۶. آموزش آنلاین تاب‌آوری ۷. کمپین‌های دیجیتال آگاهی‌رسان ۸. ارتقای سواد دیجیتال شهروندان ۹. دسترسی برابر به فناوری و اینترنت ۱۰. تعامل دوسویه شهروند و مدیریت شهری ۱۱. آموزش تاب‌آوری در مدارس و جامعه، ۱۲. شفافیت در تصمیم‌گیری از طریق داده‌های باز 1. Citizen-Centered Applications 2. Crisis and Incident Reporting Platforms 3. Electronic Voting Systems 4. Intelligent Social Networks 5. Urban Management Dialogue Platforms 6. Online Resilience Education 7. Digital Awareness Campaigns 8. Enhancement of Citizens' Digital Literacy 9. Equal Access to Technology and the Internet 10. Two-Way Interaction Between Citizens and Urban Management 11. Resilience Education in Schools and Communities 12. Transparency in Decision-Making Through Open Data.	Meijer & Bolívar, 2016; UN-Habitat, 2020b; ISO 37122, 2019 Arup, 2014; UN-Habitat, 2020a
حمل‌ونقل هوشمند (T) Smart Transportation	۱. حمل‌ونقل عمومی پایدار، ۲. مسیرهای اضطراری هوشمند، ۳. ایستگاه شارژ خودرو برقی، ۴. کنترل ترافیک برخط، ۵. طراحی مسیر داده‌محور 1.Sustainable Public Transportation 2. Smart Emergency Routes 3. Electric Vehicle Charging Stations 4. Real-Time Traffic Control 5. Data-Driven Route Design	Angelidou, 2014; UNECE, 2022
مدیریت بحران هوشمند (C) Smart Crisis Management	۱. هشدار سریع، ۲. نقشه‌های ریسک بلادرنگ، ۳. شبیه‌سازی سناریوهای بحرانی، ۴. پیام‌رسانی خودکار، ۵. سامانه فرماندهی بحران 1. Early Warning Systems 2. Real-Time Risk Maps 3. Critical Scenario Simulations 4. Automated Messaging Systems 5. Crisis Command and Control Systems	Sharifi & Yamagata, 2018; UN-Habitat, 2020b
اقتصاد هوشمند(Ec) Smart Economy	۱. نوآوری و کارآفرینی فناورانه، ۲. توسعه کسب وکارهای دیجیتال،۳. سیستم‌های پرداخت هوشمند، ۴. تجارت الکترونیک شهری، ۵. حمایت از اقتصاد مشارکتی، ۶. شفافیت اقتصادی مبتنی بر داده، ۷. زیرساخت مالی دیجیتال، ۸. جذب سرمایه‌گذاری هوشمند و پایدار 1. Technological Innovation and Entrepreneurship 2. Development of Digital Businesses 3. Smart Payment Systems 4. Urban E-Commerce 5.Support for the	Albino et al., 2015; Bibri & Krogstie, 2017; Sharifi, 2016; UNECE, 2022

Sharing Economy 6. Data-Driven Economic Transparency 7. Digital Financial Infrastructure 8. Attraction of Smart and Sustainable Investment		
معیارهای تاب‌آوری شهری Urban Resilience Criteria		
معیارها Criteria	**زیر معیارها** Sub-Criteria	**منابع** Sources
اجتماعی Social	۱. پلتفرم‌های دیجیتال برای مشارکت مردم در تصمیم‌سازی شهری ۲. آموزش‌های آنلاین درباره مدیریت بحران و افزایش سواد دیجیتال ۳. عدالت در دسترسی به خدمات ۴. شبکه‌های اجتماعی و ارتباطات آنلاین برای حمایت اجتماعی ۵. استفاده از سلامت دیجیتال برای تاب‌آوری در بحران‌ها 1. Digital Platforms for Public Participation in Urban Decision-Making 2. Online Training on Crisis Management and Digital Literacy Enhancement 3.Equity in Access to Services 4.Social Networks and Online Communication for Social Support 5.Utilization of Digital Health for Crisis Resilience	Albino et al., 2015; Batty et al.,2012; Meijer & Bolívar, 2016
اقتصادی Economic	۱. توسعهٔ اشتغال دیجیتال و کسب وکارهای نوآور ۲. خدمات مالی الکترونیکی برای افزایش دسترسی در بحران ۳. استفاده از داده‌های مکانی برای تحلیل بازار محلی ۴. رصد لحظه‌ای تراکنش‌ها و قیمت‌ها از طریق پلتفرم‌های باز ۵. استفاده از هوش مصنوعی در تطبیق فرصت‌های شغلی با مهارت‌ها 1. Development of Digital Employment and Innovative Businesses 2. Electronic Financial Services to Enhance Access During Crises 3. Use of Geospatial Data for Local Market Analysis 4. Real-Time Monitoring of Transactions and Prices via Open Platforms 5. Application of Artificial Intelligence to Match Job Opportunities with Skills	Komninos, 2013 Caragliu, Del Bo & Nijkamp, 2013; Kitchin, 2014; Sharifi, 2019
نهادی Institutional	۱. مدیریت هوشمند بحران ۲. پورتال‌های خدمات آنلاین و شفافیت عملکرد نهادها ۳. استفاده از داده‌های شهروندی برای تصمیم‌گیری شهری ۴. ابزارهای تعاملی برای سیاست‌گذاری مشترک ۵. اتصال بین سامانه‌های شهری و نهادهای مدیریتی 1. Smart Crisis Management 2. Online Service Portals and Institutional Performance Transparency 3. Utilization of Citizen-Generated Data for Urban Decision-Making 4.Interactive Tools for Collaborative Policy-Making 5.Integration Between Urban Systems and Governance Institutions	Hollands, 2008; Meijer & Bolívar, 2016; Gil-Garcia, Pardo & Nam, 2016; UN-Habitat, 2020a
زیرساختی Infrastructural	۱. حسگرها و IoT برای نظارت بر زیرساخت‌ها ۲. استفاده از شبکه‌های هوشمند ۳. سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند (ITS) و مسیرهای جایگزین ۴. زیرساخت‌های قوی ICT برای استمرار خدمات در بحران ۵. پایش لحظه‌ای وضعیت ترافیک، هوا، آب و زباله‌ها 1. Sensors and IoT for Infrastructure Monitoring 2. Utilization of Smart Networks 3. Intelligent Transportation Systems (ITS) and Alternative Routes 4. Robust ICT Infrastructure for Service Continuity During Crises 5. Real-Time Monitoring of Traffic, Weather, Water, and Waste Conditions	Kitchin, 2014 Hashem et al., 2016 Batty et al., 2012 Bibri & Krogstie, 2017

نتایج و بحث

این پژوهش با بهره‌گیری از روش دلفی دو مرحله‌ای، به منظور جمع‌آوری و هم‌سویی نظرات ۳۵ نفر از خبرگان حوزه مورد نظر انجام شد. هدف از این روش، ایجاد اجماع و پالایش آیتم‌های پیشنهادی برای دستیابی به مجموعه‌ای از مؤلفه‌های معتبر و موردپذیرش خبرگان بود. در مرحله نخست، تعداد ۴۸ شاخص به گروهی متشکل از ۳۵ خبره ارائه گردید و از ایشان خواسته شد تا اهمیت هر شاخص را با استفاده از مقیاس لیکرت پنج‌گانه ارزیابی کنند. برای تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده، شاخص‌های آماری شامل میانگین، انحراف معیار و ضریب هماهنگی کندال محاسبه شد (جدول۲). معیارهای پذیرش شاخص‌ها مبتنی بر منابع معتبر دلفی (Hasson, Keeney & McKenna, 2000; Okoli & Pawlowski, 2004; Linstone & Turoff, 1975) تعیین گردید؛ به‌طوری‌که شاخص‌هایی با میانگین برابر یا بیش از ۳.۵ و انحراف معیار کمتر از ۱ به‌عنوان شاخص‌های تأییدشده در نظر گرفته شدند.

نتایج مرحلهٔ اول نشان داد که از میان ۴۸ شاخص، ۴۲ شاخص دارای میانگین و انحراف معیار مطلوب بودند و بنابراین مورد تأیید قرار گرفتند. در مقابل، ۶ شاخص به دلیل داشتن میانگینی کمتر از ۳.۵، هرچند با انحراف معیار کمتر از ۱، با توجه نظرات خبرگان از فهرست شاخص‌ها حذف شدند. این شاخص‌ها شامل موارد S1 ، S3، ss2، it5، it6 و یک شاخص با میانگین ۳.۲۲ می‌باشند. حذف این موارد نشان‌دهندهٔ ارزیابی پایین اهمیت این شاخص‌ها از منظر خبرگان و عدم صلاحیت آن‌ها برای ادامهٔ فرآیند تحلیل بود.

در مرحلهٔ دوم، همان ۴۲ شاخص تأییدشده به‌صورت مجدد توسط گروه خبرگان ارزیابی شدند تا میزان پایداری و تداوم اجماع میان نظرات آنان مورد سنجش قرار گیرد. نتایج این مرحله نشان داد که میانگین‌ها و انحراف معیارها نسبت به مرحله اول تغییر معناداری نداشته و تمام شاخص‌ها مجدداً تأیید شدند. این ثبات و همسانی نتایج بین دو مرحله، گویای وجود اجماع قوی و انسجام نظر قابل‌توجه میان خبرگان است. به عبارت دیگر، علاوه بر اهمیت ارزیابی‌شده برای شاخص‌ها، همگرایی بالایی در دیدگاه‌های خبرگان نسبت به آن‌ها مشاهده گردید.

جدول ۲- نظرسنجی و دیدگاه خبرگان مرتبط با شهر هوشمند و ارتقای تاب‌آوری شهری در شهر زنجان

Table 2 – Expert Survey and Opinions on the Smart City and the Enhancement of Urban Resilience in Zanjan City

مرحلهٔ دوم دلفی Delphi Round One				مرحلهٔ اول دلفی Delphi Round Two				
وضعیت Mean	انحراف معیار S. Deviation	میانگین Mean	خبرگان Experts	وضعیت Status	انحراف معیار S. Deviation	میانگین Mean	خبرگان Experts	
تائید (Confirmed)	.894	3.99	35	تائید (Confirmed)	.894	3.99	35	T1
تائید (Confirmed)	.807	4.04	35	تائید (Confirmed)	.807	4.04	35	T2
تائید (Confirmed)	.714	4.18	35	تائید (Confirmed)	.714	4.18	35	T3
تائید (Confirmed)	.81098	4.1600	35	تائید (Confirmed)	.81098	4.1600	35	T4
تائید (Confirmed)	.72137	3.9150	35	تائید (Confirmed)	.72137	3.9150	35	T5
تائید (Confirmed)	.74616	3.8550	35	تائید (Confirmed)	.74616	3.8550	35	ST1
تائید (Confirmed)	.61454	4.3150	35	تائید (Confirmed)	.61454	4.3150	35	ST2
تائید (Confirmed)	.74375	4.1400	35	تائید (Confirmed)	.74375	4.1400	35	ST3
تائید (Confirmed)	.72181	3.9600	35	تائید (Confirmed)	.72181	3.9600	35	ST4
تائید (Confirmed)	.87735	3.7100	35	تائید (Confirmed)	.87735	3.7100	35	ST5
تائید (Confirmed)	.71437	3.9150	35	تائید (Confirmed)	.71437	3.9150	35	ST6
تائید (Confirmed)	.78168	3.5450	35	تائید (Confirmed)	.78168	3.5450	35	ST7
تائید (Confirmed)	.72554	4.0350	35	تائید (Confirmed)	.72554	4.0350	35	ST8
تائید (Confirmed)	.81443	3.7450	35	تائید (Confirmed)	.81443	3.7450	35	ST9
*	*	*	*	حذف(Delete)	.89953	3.4300	35	S1
تائید (Confirmed)	.80551	3.6200	35	تائید (Confirmed)	.80551	3.6200	35	S2
*	*	*	*	حذف (Delete)	.89351	3.2250	35	S3
تائید (Confirmed)	.90087	3.7500	35	تائید (Confirmed)	.90087	3.7500	35	S4
تائید (Confirmed)	.89036	3.7850	35	تائید (Confirmed)	.89036	3.7850	35	S5
تائید (Confirmed)	.68051	4.1850	35	تائید (Confirmed)	.68051	4.1850	35	S6
تائید (Confirmed)	.84340	4.0850	35	تائید (Confirmed)	.84340	4.0850	35	S7
تائید (Confirmed)	.70488	4.1750	35	تائید (Confirmed)	.70488	4.1750	35	S8
تائید (Confirmed)	.83750	3.8900	35	تائید (Confirmed)	.83750	3.8900	35	S9
تائید (Confirmed)	.77725	3.6700	35	تائید (Confirmed)	.77725	3.6700	35	S10
تائید (Confirmed)	.66431	3.9700	35	تائید (Confirmed)	.66431	3.9700	35	S11

S12	35	3.6600	.80476	تائید (Confirmed)	35	3.6600	.80476	تائید (Confirmed)
M1	35	3.9150	.68566	تائید (Confirmed)	35	3.9150	.68566	تائید (Confirmed)
M2	35	3.9300	.75362	تائید (Confirmed)	35	3.9300	.75362	تائید (Confirmed)
M3	35	3.9100	.73114	تائید (Confirmed)	35	3.9100	.73114	تائید (Confirmed)
M4	35	3.9350	.77055	تائید (Confirmed)	35	3.9350	.77055	تائید (Confirmed)
M5	35	3.7950	.77198	تائید (Confirmed)	35	3.7950	.77198	تائید (Confirmed)
M6	35	3.8650	.79998	تائید (Confirmed)	35	3.8650	.79998	تائید (Confirmed)
C1	35	4.3150	.65415	تائید (Confirmed)	35	4.3150	.65415	تائید (Confirmed)
C2	35	2.7700	.92269	حذف (Delete)	❋	❋	❋	❋
C3	35	4.3800	.64629	تائید (Confirmed)	35	4.3800	.64629	تائید (Confirmed)
C4	35	3.9950	.79254	تائید (Confirmed)	35	3.9950	.79254	تائید (Confirmed)
C5	35	3.6150	.86633	تائید (Confirmed)	35	3.6150	.86633	تائید (Confirmed)
C6	35	3.6250	.84733	تائید (Confirmed)	35	3.6250	.84733	تائید (Confirmed)
Ec1	35	4.1050	.54356	تائید (Confirmed)	35	4.1050	.54356	تائید (Confirmed)
Ec2	35	3.6900	.76605	تائید (Confirmed)	35	3.6900	.76605	تائید (Confirmed)
Ec3	35	3.9850	.65338	تائید (Confirmed)	35	3.9850	.65338	تائید (Confirmed)
Ec4	35	4.0950	.74076	تائید (Confirmed)	35	4.0950	.74076	تائید (Confirmed)
Ec5	35	3.2000	.88539	حذف (Delete)	*	❋	❋	❋
Ec6	35	3.2300	.87804	حذف (Delete)	*	❋	❋	❋
Ec7	35	3.9700	.70824	تائید (Confirmed)	35	3.9700	.70824	تائید (Confirmed)
Ec8	35	3.9300	.66128	تائید (Confirmed)	35	3.9300	.66128	تائید (Confirmed)

شاخص ضریب هماهنگی کندال[1] در مرحلهٔ اول برابر ۰/۵۹۲ بود که نشانگر وجود هماهنگی متوسط بین نظرات شرکت‌کنندگان است. پس از اعمال اصلاحات و دریافت بازخوردهای مرحله اول، مرحله دوم دلفی برگزار شد. در این مرحله، شاخص ضریب هماهنگی کندال به ۰/۷۱۲ افزایش یافت که نشان‌دهندهٔ بهبود چشمگیر همگرایی و اجماع در میان خبرگان است. این افزایش قابل توجه بیانگر اثربخشی روند بازنگری و تکرار نظرخواهی در ارتقای هماهنگی دیدگاه‌ها می‌باشد؛ و نتایج آزمون کای‌اسکوئر با مقدار معناداری ۰/۰۰۰ نیز تأیید کرد که این میزان هماهنگی معنادار است؛ بنابراین براساس جدول ۳ فرآیند دلفی دومرحله‌ای به خوبی توانست با استفاده از مشارکت خبرگان، ابهامات و اختلاف‌نظرهای اولیه را کاهش دهد و به یک اجماع معنادار برسد. حذف مؤلفه‌های با توافق پایین و تقویت هماهنگی میان نظرات، کیفیت داده‌های نهایی را بهبود بخشیده و اعتبار علمی نتایج را افزایش داده است.

1- Kendall’s Wa

جدول ۳- میزان توافق خبرگان در دو مرحله دلفی از طریق تحلیل ضریب هماهنگی کندال

Table 3 – Expert Agreement Levels in Two Delphi Rounds Based on Kendall's Coefficient of Concordance Analysis

مرحله دوم دلفی Delphi Round Two		مرحله اول دلفی Delphi Round One	
آمار آزمون Test Statistic		آمار آزمون Test Statistic	
35	تعداد(N) Sample Size (N)	35	تعداد(N) Sample Size (N)
0/712	ضریب هماهنگی کندال Kendall's Coefficient of Concordance	0/592	ضریب هماهنگی کندال Kendall's Coefficient of Concordance
898/053	مقدار کای اسکوئر Chi-Square Value	108/053	مقدار کای اسکوئر Chi-Square Value
40	درجه آزادی(df) Degrees of Freedom (df)	40	درجه آزادی(df) Degrees of Freedom (df)
0/000	سطح معناداری Significance Level (p-value)	0/000	سطح معناداری Significance Level (p-value)

بررسی میزان اهمیت و نحوهٔ اثرگذاری و اثرپذیری مؤلفه‌های شناسایی‌شده با استفاده از بارهای عاملی

به‌منظور بررسی نقش ابعاد مختلف شهر هوشمند در ارتقای تاب‌آوری شهر زنجان، تحلیل عاملی تأییدی بر مجموعه‌ای از گویه‌ها انجام گرفت. نتایج به دست آمده در جدول ۴، بارهای عاملی هر شاخص را در ارتباط با متغیرهای مربوطه نشان می‌دهد. بررسی این بارها نشان می‌دهد که کلیهٔ شاخص‌ها دارای ضرایب عاملی بالاتر از ۰/۷۰ هستند که از کفایت و اعتبار سازه‌ای مناسبی برخوردارند و دلالت بر تبیین‌پذیری بالای متغیرهای پنهان دارند.

در این میان، زیرساخت‌های هوشمند (با دامنه بار عاملی بین ۰/۷۰۷۶ تا ۰/۸۵۳۸)، یکی از مؤثرترین ابعاد شهر هوشمند در ارتقای تاب‌آوری شهر زنجان به شمار می‌رود. وجود حسگرهای محیطی، شبکه‌های هوشمند برق، اینترنت پرسرعت پایدار به‌طور مستقیم در مقاوم‌سازی شهرها در برابر بحران‌های طبیعی و انسانی مؤثرند. همچنین، مدیریت بحران هوشمند نیز با میانگین بار عاملی بالا (در بازه ۰/۸۰۰۲ تا ۰/۸۷۰۲) از دیگر مؤلفه‌های کلیدی در ارتقای تاب‌آوری شهر زنجان است که توانمندی شهر را در پاسخ‌دهی سریع، هماهنگ و کارآمد در شرایط بحرانی تقویت می‌کند. اجتماع هوشمند با میانگین بار عاملی حدود ۰/۷۸ نیز نقش مهمی در ارتقای تاب‌آوری اجتماعی ایفا می‌کند. شاخص‌هایی نظیر پلتفرم گفت‌وگو با مدیریت شهری، آموزش آنلاین تاب‌آوری، کمپین‌های دیجیتال آگاهی‌رسان، ارتقای سواد دیجیتال شهروندان بسیار مؤثرند. از سوی دیگر، اقتصاد هوشمند با بارهای عاملی نسبتاً بالا (بین ۰/۷۰۸۸ تا ۰/۸۹۰۵) در پیوند با تاب‌آوری اقتصادی، پایداری مالی و تنوع منابع درآمدی در شرایط بحرانی را امکان‌پذیر می‌سازد. مدیریت داده و تحلیل نیز با دامنه بارهای عاملی بین ۰/۷۱۷۴ تا ۰/۷۹۴۹، به‌عنوان بستر اصلی تحلیل داده‌های شهری و پشتیبان تصمیم‌گیری دقیق و هوشمند، نقشی اساسی در ارتقای تاب‌آوری نهادی ایفا می‌کند. همچنین، حمل‌ونقل هوشمند با میانگین بار عاملی حدود ۰/۷۹، از طریق ارتقای سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی، مسیرهای اضطراری هوشمند، ایستگاه شارژ خودرو برقی، کنترل ترافیک برخط، در افزایش تاب‌آوری کالبدی و کاهش پیامدهای بحران‌ها نقش‌آفرینی می‌کند.

در ابعاد چهارگانه تاب‌آوری شهر زنجان شامل تاب‌آوری اجتماعی (۰/۸۰۶۷)، تاب‌آوری اقتصادی (۰/۷۸۵۱)، تاب‌آوری زیرساختی (۰/۸۶۲۶) و تاب‌آوری نهادی (۰/۸۴۰۵)، هر ابعاد چهارگانه دارای بارهای عاملی بسیار بالا بوده و به‌خوبی توسط مؤلفه‌های شهر هوشمند تبیین شده‌اند. این نتایج بیانگر آن است که تحقق مؤلفه‌های شهر هوشمند در شهر زنجان، نه تنها موجب بهبود عملکرد شهری زنجان در شرایط عادی می‌شود، بلکه به‌طور معناداری ظرفیت‌های تاب‌آوری آن را در ابعاد مختلف تقویت می‌کند.

اطلاعات جدول ۴ نشان می‌دهد که مقادیر تمامی بارهای عاملی گویه‌ها بالاتر از ۰/۵ است که برای محاسبه متغیرهای پنهان مدل مقیاس بسیار قابل قبولی به حساب می‌آیند. مقدار بار عاملی بین ۰/۲ تا ۰/۳ نشان‌دهندهٔ مقیاس ضعیف بوده و احتمالاً باید از مدل حذف شود. بارهای عاملی بین ۰/۳ تا ۰/۵ نشان می‌دهد که متغیر مشاهده شده دارای مقیاس نسبتاً ضعیفی بوده ولی در عین حال برای ادامهٔ آنالیز کفایت می‌کند. مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۵ نیز نشان می‌دهند که متغیر مشاهده‌پذیر مقیاس قابل‌اطمینان برای محاسبه متغیر پنهان است.

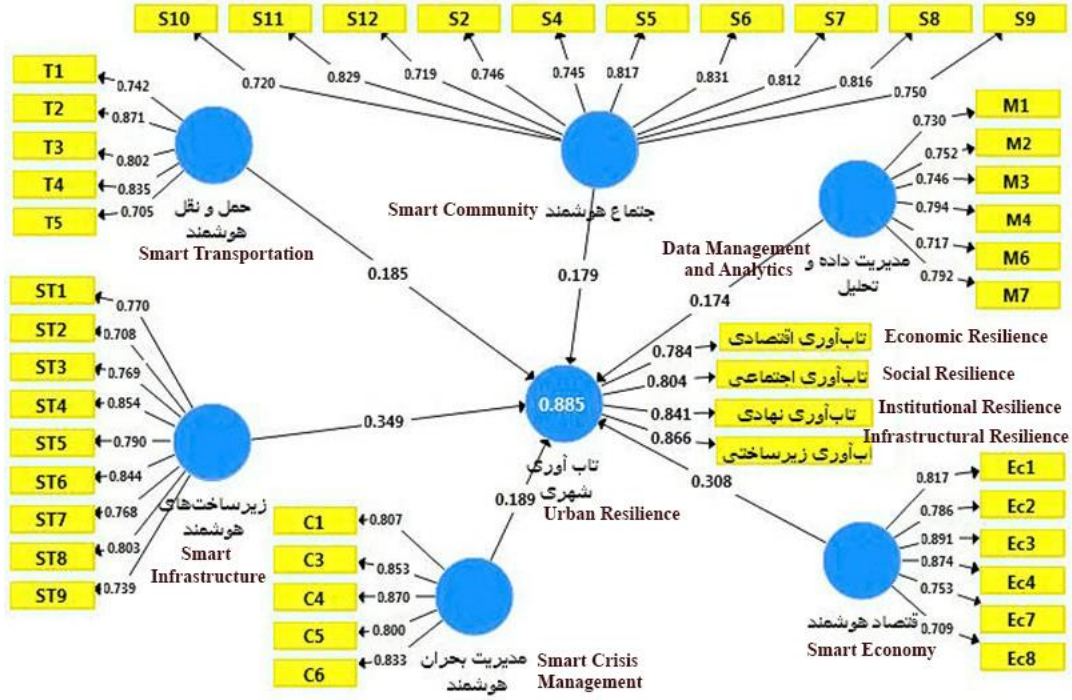
جدول ۴- جدول نتایج بارهای عاملی

Table 4 – Factor Loadings Results

معیارها Criteria	زیر معیارها Sub-Criteria	بار عاملی Factor Loading	معیارها Criteria	زیر معیارها Sub-Criteria	بار عاملی Factor Loading
حمل‌ونقل هوشمند (T) Smart Transportation	T1	0.7423	مدیریت داده و تحلیل (M) Data Management and Analytics	M1	0/7300
	T2	0/8707		M2	0/7522
	T3	0/8018		M3	0/7460
	T4	0/8346		M4	0/7942
	T5	0/7052		M6	0/7174
زیرساخت‌های هوشمند (ST) Smart Infrastructure	ST1	0/7703		M7	0/7919
	ST2	0/7076	مدیریت‌بحران هوشمند (C) Smart Crisis Management	C1	0/8071
	ST3	0/7694		C3	0/8529
	ST4	0/8538		C4	0/8702
	ST5	0/7902		C5	0/8002
	ST6	0/8440		C6	0/8325
	ST7	0/7676	اقتصاد هوشمند (Ec) Smart Economy	Ec1	0/8169
	ST8	0/8031		Ec2	0/7863
	ST9	0/7385		Ec3	0/8905
	S10	0/7199		Ec4	0/8739
	S11	0/8292		Ec7	0/7525
	S12	0/7188		Ec8	0/7088
اجتماع هوشمند (S) Smart Community	S2	0/7465	تاب آوری شهری Urban Resilience	تاب‌آوری اجتماعی	0/8067
	S4	0/7455		تاب‌آوری اقتصادی	0/7851
	S5	0/8172		تاب‌آوری زیرساختی	0/8626
	S6	0/8313		تاب‌آوری نهادی	0/8405
	S7	0/8124			
	S8	0/8156			
	S9	0/7499			

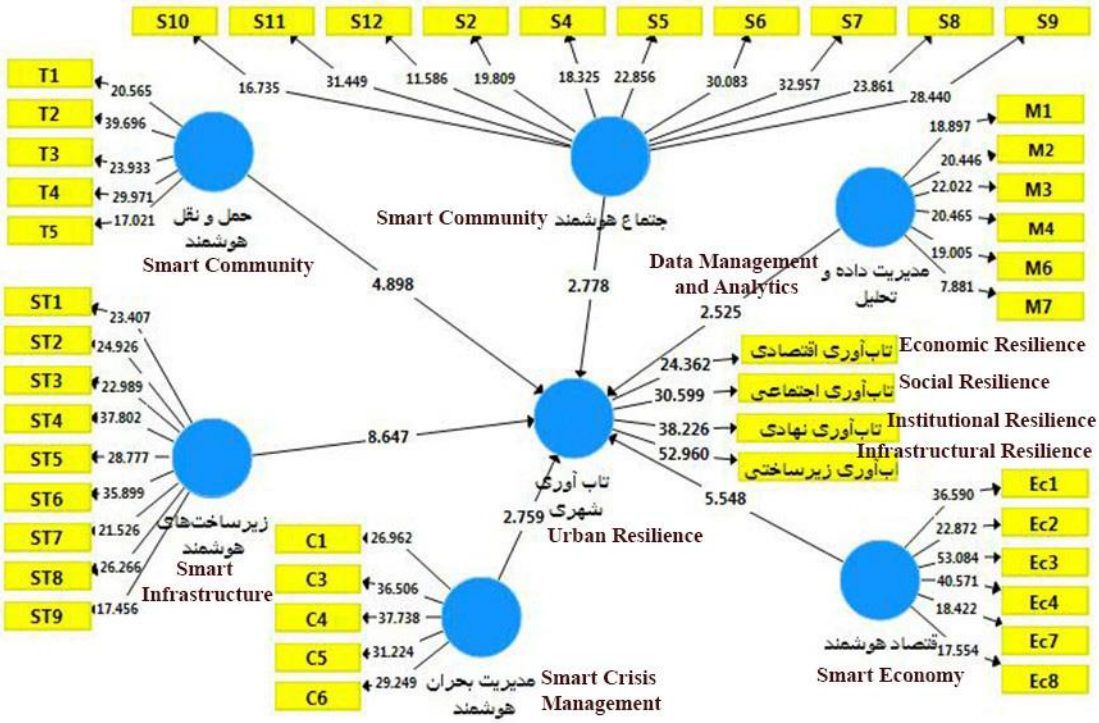
ضرایب مسیر و معناداری آن

ضریب مسیر بیان‌کننده وجود رابطه علی خطی و شدت و جهت این رابطه بین دو متغیر پنهان است. در حقیقت همان ضریب رگرسیون در حالت استاندارد است که در مدل‌های ساده‌تر رگرسیون ساده و چندگانه مشاهده می‌شود. عددی بین ۱- تا ۱+ است که ضرایب مسیر مثبت نشان‌دهنده روابط مستقیم و ضرایب مسیر منفی نشان‌دهنده روابط معکوس بین متغیرهای پنهان مستقل و وابسته می‌باشد و اگر برابر با صفر شوند، نشان‌دهندهٔ نبود رابطه علی خطی بین دو متغیر پنهان است. این مقدار از نظر بزرگی نشان‌دهندهٔ قدرت رابطه می‌باشد که با برقرار شدن روابط غیرمستقیم از میزان بزرگی یک ضریب بتا کاسته می‌شود، به همین منظور برخی از محققان بر ضرورت اثرات کلی که ترکیبی از اثر مستقیم (ضریب مسیر یا بتا) و غیرمستقیم است تأکید دارند. ضرایب مسیر اثرات مستقیم و مقدار t متناظر با آن از نرم‌افزار Smart-PLS استخراج شده است در جدول شماره ۵ و شکل شماره ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲- نتایج تجزیه و تحلیل PLS

Fig. 2. PLS analysis results



شکل ۳- نتایج تجزیه و تحلیل اماره T

Fig. 3. T-statistics analysis results

در راستای تبیین نقش مؤلفه‌های مختلف شهر هوشمند در ارتقای تاب‌آوری شهری، مدل‌یابی معادلات ساختاری با استفاده از روش تحلیل مسیر در PLS انجام شد. جدول ۵ نتایج تحلیل مسیرهای مستقیم میان متغیرهای مستقل (ابعاد شهر هوشمند) و متغیر وابسته (تاب‌آوری شهری) را نشان می‌دهد. شاخص‌های مورداستفاده برای تحلیل شامل ضریب مسیر(β) ، آماره t و سطح معناداری (p-value) هستند. معیار رد یا پذیرش اثرات در سطح اطمینان ۹۹ درصد (سطح معناداری ۰/۰۱) در نظر گرفته شده است. نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد، تمامی ابعاد شهر هوشمند اثر مثبت و معناداری بر تاب‌آوری شهر زنجان دارند ($p < 0.01$) که حاکی از اعتبار بالای مدل مفهومی و فرضیات پژوهش است. در میان متغیرهای مورد بررسی، حمل‌ونقل هوشمند با بالاترین ضریب مسیر (β =۰/۳۴۹۰) و آماره t برابر ۸/۶۴، بیشترین تأثیر را بر تاب‌آوری شهر زنجان دارد. یافته‌ها نشان می‌دهد سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند نقش اساسی در بهبود تحرک‌پذیری، کاهش آسیب‌پذیری و تقویت تاب‌آوری کالبدی در شهر زنجان دارد. پس از آن، مدیریت داده و تحلیل (β =۰/۳۰۸۱) نقش قابل توجهی در تاب‌آوری نهادی ایفا می‌کند، چراکه دادهٔ محوری آمارهای دقیق موجب بهبود تصمیم‌گیری و واکنش سریع‌تر به مخاطرات می‌شود. همچنین، اجتماع هوشمند، مدیریت بحران هوشمند، زیرساخت‌های هوشمند و اقتصاد هوشمند نیز به ترتیب دارای اثراتی معنادار و مثبت بر ارتقای تاب‌آوری اجتماعی، نهادی، زیرساختی و اقتصادی هستند؛ بنابراین توسعه ابعاد مختلف شهر هوشمند به‌طور مستقیم و معنادار می‌تواند به افزایش تاب‌آوری شهری در برابر مخاطرات طبیعی و انسانی منجر شود. در این میان، ارتقای زیرساخت‌های هوشمند، حمل‌ونقل پایدار، بهره‌گیری از تحلیل داده‌های بلادرنگ، مشارکت فعالانه شهروندان و تقویت بنیان‌های اقتصاد دیجیتال از مهم‌ترین راهبردها در تقویت تاب‌آوری چند سطحی شهر زنجان به شمار می‌روند.

جدول ۵- نتایج تحلیل مسیر مؤلفه‌های شهر هوشمند بر تاب‌آوری شهری

Table 5 – Path Analysis Results of Smart City Components on Urban Resilience

مسیر مستقیم Direct Path		اثر مستقیم Direct Effect			
متغیر مستقل Independent Variable	متغیر وابسته Dependent Variable	ضریب مسیر β Path Coefficient (β)	آماره t T-Statistic (t-value)	سطح معناداری P-value Significance Level (p-value)	رد تأیید در سطح ۰/۰۱ Confirmation at 0.01 Level
زیرساخت‌های هوشمند (ST) Smart Infrastructure (ST)	تاب‌آوری شهری Urban Resilience	0/1789	2/7777	0/0057	تائید Confirmed
مدیریت داده و تحلیل (M) Data Management and Analytics (M)		0/3081	5/5475	0/0000	تائید Confirmed
اجتماع هوشمند (S) Smart Community (S)		0/1855	4/8982	0/0000	تائید Confirmed
حمل‌ونقل هوشمند (T) Smart Transportation (T)		0/3490	8/6472	0/0000	تائید Confirmed
مدیریت بحران هوشمند (C) Smart Crisis Management (C)		0/1892	2/7586	0/0092	تائید Confirmed
اقتصاد هوشمند (Ec) Smart Economy (Ec)		0/1740	2/5253	0/0058	تائید Confirmed

به‌منظور بررسی میزان اثر کلی شهر هوشمند بر تاب‌آوری شهر زنجان، تحلیل مسیر ساختاری با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری انجام گرفت. مطابق با نتایج حاصل از جدول ۶، ضریب تأثیر کل شهر هوشمند بر تاب‌آوری شهر زنجان در برابر مخاطرات محیطی برابر با ۰/۸۸۴۶ به دست آمده است. این ضریب بیانگر تأثیر قوی و معنادار شهر هوشمند به‌عنوان یک متغیر کلان و ترکیبی بر ارتقای تاب‌آوری شهر زنجان است. مقدار بالای ضریب تأثیر نشان می‌دهد که به‌کارگیری مؤلفه‌های هوشمند سازی در مدیریت شهر زنجان (اعم از زیرساخت‌های فناورانه، حمل‌ونقل هوشمند، سامانه‌های تحلیل داده، مدیریت بحران نوین، مشارکت شهروندی و اقتصاد دیجیتال) می‌تواند سهمی قابل‌توجه در افزایش تاب‌آوری چندبعدی شهر زنجان ایفا کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که شهر هوشمند نه‌تنها ابزاری برای ارتقای کیفیت خدمات شهری در شرایط عادی است، بلکه در مواجهه با مخاطرات محیطی (نظیر زلزله، سیل، آلودگی هوا و تغییرات اقلیمی) نیز به‌عنوان عامل تسهیل‌کننده عمل می‌کند. این اثرگذاری گسترده می‌تواند ناشی از به‌کارگیری فناوری‌های نوین، تحلیل بلادرنگ اطلاعات، تصمیم‌گیری هوشمند و ایجاد ساختارهای منعطف در سطوح مدیریتی، اجتماعی و اقتصادی باشد.

جدول ۶- میزان تأثیر متغیر مستقل (شهر هوشمند) بر متغیر وابسته (تاب‌آوری شهری در برابر مخاطرات محیطی)

Table 6 – Effect of the Independent Variable (Smart City) on the Dependent Variable (Urban Resilience Against Environmental Hazards)

ضریب تأثیر Impact Coefficient (β)	فرضیه Hypothesis
0/8846	نقش شهر هوشمند در ارتقای تاب‌آوری شهر زنجان The role of Smart City in enhancing urban resilience in Zanjan city

جدول نیکویی برازش مدل نشان می‌دهد که مدل تخمینی از نظر کیفیت برازش مناسب است. شاخص‌های مهم مانند SRMR(۰/۰۸۶۵) و NFI(۰/۹۴۱) مقادیر قابل قبولی دارند و بیانگر برازش خوب مدل هستند. همچنین فاصله‌های اقلیدسی و هندسی کمتر از حد معیار تعیین‌شده‌اند که تأییدکننده تطابق مدل با داده‌هاست. مقدار کای‌اسکوئر بیشتر است اما با توجه به سایر شاخص‌ها، مدل از نظر برازش قابل‌قبول است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد مدل مورد بررسی برازش مناسبی دارد و قابل اعتماد است. نتایج برازش مدل در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷- نیکویی برازش مدل

Table 7 –Model Fit Assessment

نتیجه Result	مقدار قابل تأیید Acceptable Value	مدل تخمینی Estimated Model	مدل‌استاندارد Standard Model		نوع شاخص Index Type
تأیید confirmed	مقادیر نزدیک به صفر Values close to zero	0/0865	0/0865	SRMR	ریشهٔ میانگین استاندارد شده مجذور باقیمانده Standardized Root Mean Square Residual (SRMR)
تأیید confirmed	کمتر از ۰.۹۵ > 0/95	0/0743	0/0743	d_ULS	مربع فاصله اقلیدسی Euclidean Distance Squared (d_ULS)
تأیید confirmed	کمتر از ۰.۹۵ > 0/95	0/851	0/851	d_G	فاصلهٔ هندسی Geodesic Distance (d_G)
تأیید confirmed	بیش از ۵۰ < 50	87/658	87/658	Chi-Square	کای اسکوئر Chi-Square
تأیید confirmed	بیش‌تر از ۰/۹ < 0/90	0/941	0/941	NFI	شاخص برازش هنجار شده Normed Fit Index (NFI)

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با هدف بررسی و تبیین نقش شهر هوشمند در ارتقای تاب‌آوری شهری در برابر مخاطرات محیطی، شهر زنجان به‌عنوان نمونهٔ موردی انتخاب شد. این انتخاب با توجه به رشد سریع کالبدی، تمرکز جمعیت و آسیب‌پذیری فزاینده شهر در برابر مخاطرات طبیعی همچون سیلاب، خشکسالی و گرما، از اهمیت بالایی برخوردار است. با استفاده از رویکردی ترکیبی شامل تحلیل نظری، روش دلفی و مدل‌سازی معادلات ساختاری در نرم‌افزارPLS ، ابعاد مختلف شهر هوشمند شامل زیرساخت‌های هوشمند، مدیریت داده و تحلیل، اجتماع هوشمند، حمل‌ونقل هوشمند، مدیریت بحران هوشمند و اقتصاد هوشمند در ارتباط با تاب‌آوری شهری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از روش دلفی دو مرحله‌ای با مشارکت ۳۵ خبره نشان داد که میان شاخص‌های شهر هوشمند و ابعاد چهارگانه تاب‌آوری (اجتماعی، اقتصادی، نهادی و زیرساختی) همگرایی و توافق بالایی وجود دارد. در تحلیل‌های آماری، ضریب هماهنگی کندال در مرحله دوم به ۰/۷۱۲ افزایش یافت و سطح معناداری آزمون‌ها بیانگر تأیید اجماع خبرگان بود.

تحلیل بارهای عاملی تأییدی نشان داد که همه مؤلفه‌های شهر هوشمند بارهای عاملی قابل قبولی داشته‌اند (بیش از ۰/۷) که بیانگر اعتبار مفهومی بالا و تبیین‌پذیری مناسب مدل است. در این میان، زیرساخت‌های هوشمند، حمل‌ونقل هوشمند و مدیریت بحران هوشمند بیشترین تأثیر را بر تاب‌آوری شهر زنجان داشتند. نتایج تحلیل مسیر نیز بیانگر آن بود که تمامی مؤلفه‌های شهر هوشمند تأثیر مثبت و معناداری بر تاب‌آوری شهر زنجان دارند. از میان آن‌ها، حمل‌ونقل هوشمند با ضریب مسیر ۰/۳۴۹ بیشترین نقش را در ارتقای تاب‌آوری ایفا کرده و پس‌ازآن، مدیریت داده و تحلیل و اجتماع هوشمند نیز نقش قابل‌توجهی داشتند؛ بنابراین، ضریب تأثیر کل شهر هوشمند بر تاب‌آوری شهر زنجان برابر با ۰/۸۸۴۶ به دست آمد که بیانگر اثرگذاری قوی این متغیر ترکیبی بر تقویت ظرفیت‌های تاب‌آوری شهر زنجان است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که توسعه فناوری‌های هوشمند، ایجاد سیستم‌های اطلاعاتی لحظه‌ای، مشارکت فعالانه شهروندان، تقویت زیرساخت‌های فناورانه و تحول در نظام تصمیم‌گیری شهری، می‌تواند به‌طور معناداری زمینه‌ساز افزایش تاب‌آوری شهر در برابر مخاطرات محیطی باشد.

یافته‌های این پژوهش مبنی بر نقش مثبت و معنادار مؤلفه‌های شهر هوشمند در ارتقای ابعاد مختلف تاب‌آوری شهری در شهر زنجان، با نتایج مطالعات پیشین هم‌خوانی و هم‌پوشانی قابل‌توجهی دارد و یافته‌های حاصل از پژوهش حاضر تأییدکننده یافته‌های بتی و همکاران (Batty et al., 2012) است که بر اهمیت استفاده از داده‌های بلادرنگ، اینترنت اشیا و سیستم‌های هشدار سریع برای بهبود واکنش شهرها در برابر بحران‌ها تأکید داشتند. یافته‌های این پژوهش نیز نشان داد که زیرساخت‌های هوشمند، مدیریت بحران هوشمند و تحلیل داده‌های لحظه‌ای در افزایش ظرفیت پاسخ‌گویی شهر زنجان نقش کلیدی ایفا می‌کنند. همچنین، نتایج این پژوهش با مطالعات ژو و وانگ (Zhou & Wang, 2020) نیز هم‌راستا است. آن‌ها تأکید داشتند که فناوری‌های هوشمند می‌توانند تاب‌آوری اجتماعی و نهادی را در مقابله با بحران‌هایی مانند کووید -۱۹ ارتقاء دهند. در این پژوهش نیز مؤلفه‌هایی مانند «اجتماع هوشمند» و «مدیریت داده و تحلیل» نقش مؤثری در تقویت تاب‌آوری اجتماعی و نهادی شهر زنجان ایفا کرده‌اند. علاوه بر این، نتایج مطالعه حاضر با تحلیل سیستماتیک ییگیت‌کانلار و همکاران (Yigitcanlar et al., 2020) هم‌خوان است که شرط موفقیت شهرهای هوشمند در تاب آور شدن را نهادینه شدن فناوری در ساختارهای مدیریتی و اجتماعی دانستند. یافته‌های این تحقیق نیز گویای آن است که نهادینه‌سازی فناوری در ساختارهای شهری زنجان، موجب ارتقای معنادار تاب‌آوری در ابعاد مختلف شده است و نتایج پژوهش حاضر هم‌سو با یافته‌های قریشی و همکاران (Ghoreishi et al., 2020) است که تأکید کرده‌اند نظریه‌های شهر هوشمند و تاب آور نیازمند تلفیق نظام‌مند و ساختاریافته هستند. پژوهش حاضر با ارائه یک چارچوب مفهومی و تلفیق‌گرایی میان مؤلفه‌های این دو رویکرد، عملاً به این پیشنهاد نظری پاسخ داده است .با توجه به یافته‌های پژوهش حاضر پیشنهاد ذیل ارائه می‌شود: توسعهٔ سیستم‌های پایش هوشمند آب، برق و گاز برای کاهش اختلالات در زمان بحران، راه‌اندازی اپلیکیشن‌های شهروندی برای اطلاع‌رسانی و مشارکت مردمی در مواقع اضطراری، تقویت کسب وکارهای فناورانه و استارتاپ‌های شهری در حوزهٔ خدمات اضطراری، ارتقاء زیرساخت‌های

فناورانه و سنجش پذیری محیطی در مناطق پرخطر، حمایت از اقتصاد دیجیتال و کسب‌وکارهای تاب آور شهری، تهیه و تصویب سند راهبردی «شهر هوشمند تاب آور زنجان»

سپاسگزاری

با نهایت احترام و سپاس، بر خود واجب می‌دانیم از تمامی افرادی که در انجام این پژوهش ما را یاری کردند، تشکر و قدردانی نمایم. از نهادها و سازمان‌هایی که با فراهم کردن داده‌ها و اطلاعات موردنیاز، بستر لازم را برای انجام دقیق‌تر تحقیق مهیا ساختند، صمیمانه قدردانی می‌شود. توفیق روزافزون همه عزیزان را از درگاه ایزد منان خواستاریم.

References

Ahern, J. (2011). From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning, 100*(4), 341–343. http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.021

Albino, V., Berardi, U., & Dangelico, R. M. (2015). Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives. *Journal of urban technology, 22*(1), 3-21. http://dx.doi.org/10.1080/10630732.2014.942092

Angelidou, M. (2014). Smart city policies: A spatial approach. *Cities, 41*, S3–S11. https://doi.org/10.1016/j.cities.2014.06.007

Arup. (2014). *City Resilience Framework*. Rockefeller Foundation. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2252179

Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., ... & Portugali, Y. (2012). Smart cities of the future. *The European Physical Journal Special Topics*, *214*(1), 481-518. https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3

Bibri, S. E., & Krogstie, J. (2017). Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. *Sustainable Cities and Society, 31*, 183–212. https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.016

Caragliu, A., Del Bo, C., & Nijkamp, P. (2013). Smart cities in Europe. In *Creating smart-er cities* (pp. 65-82). Routledge. https://doi.org/10.1080/10630732.2011.601117

Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., & Webb, J. (2008). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global environmental change, 18*(4), 598-606. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013

Davoudi, S., Shaw, K., Haider, L. J., Quinlan, A. E., Peterson, G. D., Wilkinson, C., ... & Davoudi, S. (2012). Resilience: a bridging concept or a dead end?"Reframing" resilience: challenges for planning theory and practice interacting traps: resilience assessment of a pasture management system in Northern Afghanistan urban resilience: what does it mean in planning practice? Resilience as a useful concept for climate change adaptation? The politics of resilience for planning: a cautionary note: edited by Simin Davoudi and Libby Porter. *Planning Theory & Practice, 13*(2), 299-333. http://dx.doi.org/10.1080/14649357.2012.677124

Fotouhi, S., Hosseinian Rad, A., & Yazdani, S. (2025). Investigating the effects of smart city dimensions on urban resilience in Khorramabad. *Journal of Economic Geography Research*, e722498. [In Persian] https://doi.org/10.30470/jegr.2025.2048851.1258

Ghoreishi, G. S., Parsi, H. R., & Nourian, F. (2020). An analysis of the theoretical domain of the resilient smart city and developing an application framework. *Fine Arts Journal: Architecture and Urban Planning, 25*(4), 55–69. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jfaup.2021.329235.672671

Gil-Garcia, J. R., Pardo, T. A., & Nam, T. (2016). *Smart cities and smart government: Assessing innovation and change*. Government Information Quarterly.

Hashem, I. A. T., Chang, V., Anuar, N. B., Adewole, K., Yaqoob, I., Gani, A., ... & Chiroma, H. (2016). The role of big data in smart city. *International Journal of Information Management, 36*(5), 748-758. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2016.05.002

Hasson, F., Keeney, S., & McKenna, H. (2000). Research guidelines for the Delphi survey technique. *Journal of Advanced Nursing, 32*(4), 1008–1015. https://doi.org/10.1046/j.1365-2648.2000.t01-1-01567.x

Hollands, R. G. (2008). Will the real smart city please stand up? City: Analysis of Urban Trend, Culture, Theory. *Policy, Action, 12*(3), 303-320. https://doi.org/10.1080/13604810802479126

Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *4*, 1–23. http://www.jstor.org/stable/2096802

IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. https://doi.org/10.1017/9781009325844

ISO 37122: 2019. (2019). *Sustainable cities and communities – Indicators for Smart Cities*. International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/69050.html

Kitchin, R. (2014). The real-time city? Big data and smart urbanism. *GeoJournal, 79*(1), 1-14. http://dx.doi.org/10.1007/s10708-013-9516-8

Komninos, N. (2013). *Intelligent cities: innovation, knowledge systems and digital spaces*. Routledge. http://dx.doi.org/10.4324/9780203857748

Lall, S. V., & Deichmann, U. (2012). Density and disasters: economics of urban hazard risk. *The World Bank Research Observer, 27*(1), 74-105. http://dx.doi.org/10.2307/23262822

Li, C., Sun, N., Lu, Y., Guo, B., Wang, Y., Sun, X., & Yao, Y. (2022). Review on urban flood risk assessment. *Sustainability, 15*(1), 765. https://doi.org/10.3390/su15010765

Linstone, H. A., & Turoff, M. (Eds.). (1975). *The delphi method* (Vol. 1975, pp. 3-12). MA: Addison-Wesley. http://dx.doi.org/10.2307/3150755

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.2015.11.011

Meijer, A., & Bolívar, M. P. R. (2016). Governing the smart city: a review of the literature on smart urban governance. *Government Information Quarterly, 33*(2), 207–213. http://dx.doi.org/10.1177/0020852314564308

Okoli, C., & Pawlowski, S. D. (2004). The Delphi method as a research tool: An example, design considerations and applications. *Information & Management, 42*(1), 15–29. https://doi.org/10.1016/j.im.2003.11.002

Shahivandi, A., & Pourhasanzadeh, M. H. (2023). Explaining the components and indicators of smart cities affecting urban resilience against COVID-19: Case study of Shiraz city. *Journal of Urban Planning Geography Research, 11*(4), 257–277. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2024.369884.1895

Sharifi, A. (2016). A critical review of selected tools for assessing community resilience. *Ecological Indicators, 69*, 629–647. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.05.023

Sharifi, A. (2019). A critical review of selected smart city assessment tools and indicator sets. *Journal of Cleaner Production, 233*, 1269-1283. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.172

Sharifi, A., & Yamagata, Y. (2018). Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 60*, 1654–1677. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.028

Tahmasebi Moghadam, H., Heydari, M. T., Alibakshi, A., & Rasoulzadeh, Z. (2025). Analysis of Key Social Factors Influencing the Resilience of Zanjan City Against Natural and Environmental Hazards. *Journal of Geographical Studies of Mountainous Areas*, *5*(4), 111-134. [In Persian] https://gsma.lu.ac.ir/article_722137.html

Tahmasebi Moghaddam, H., Ahadnejad Reveshty, M., Heydari, M. T., & Shoghli, A. (2021). Explaining the factors affecting social resilience against biological hazards with an emphasis on COVID-19 (Case study: Zanjan city).

Geography and Environmental Hazards, 10(1), 1–19. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.67234.0

UNECE. (2022). *Guidelines on People-first Public-Private Partnerships for the Sustainable Development Goals*. United Nations Economic Commission for Europe. https://unece.org/sites/default/files/2022-10/ECE_CECI_WP_PPP_2022_06-en.pdf

UN-Habitat. (2020a). *People-Centered Smart Cities: How smart can our cities be?* https://unhabitat.org/programme/legacy/people-centered-smart-cities

UN-Habitat. (2020b). *Smart Cities and Resilience: A Framework for Action*. https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/05/cityrap_tool_booklet_2020.pdf

Un-Habitat. (2022). *World cities report 2022: envisaging the future of cities*. UN. https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr_2022.pdf

United Nations. (2022). *Department of Economic and Social Affairs, Population Division*. World Urbanization Prospects: The 2022 Revision. https://population.un.org/wup/

Yigitcanlar, T., Kamruzzaman, M., Foth, M., Sabatini-Marques, J., Da Costa, E., & Ioppolo, G. (2019). Can cities become smart without being sustainable? A systematic review of the literature. *Sustainable Cities and Society*, *45*, 348-365. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.033

Zheng, Y. (2019). *Urban computing*. MIT Press. https://mitpress.mit.edu/9780262039086/urban-computing/

Zhou, Y., & Wang, S. (2020). Smart city resilience against COVID-19: The role of big data and digital governance. *Cities, 107*, 102984. https://doi.org/10.3390/su141912645

Vol.14, No.4, Winter 2025, p. 201-229 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.93302.1570 OPEN ACCESS

Sustainable Design of Urban Green Spaces for Noise Mitigation under a Climate Adaptation Framework

Ahmad Hossayni [1*], **Zeynab Karimzadeh Motlagh** [2]

[1*] Assistant Professor, Department in Climatology, Payame Noor University, Iran
[2] Faculty Member, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science (INIOAS), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 23 May 2025

Revised: 25 August 2025

Accepted: 26 August 2025

Available Online: 7 September 2025

Keywords:

Urban Green Spaces

Noise Pollution

Urban Sustainability

Climate Change

Drought-Resistant Species

Long Short-Term Memory (LSTM)

ABSTRACT

Global warming and its intensifying effects on arid urban regions highlight the necessity of integrated urban planning strategies. This study aims to forecast climate trends, evaluate the role of vegetation in mitigating noise pollution, identify drought-resistant plant species, and propose sustainable strategies for green space management in Birjand city. Annual temperature changes were predicted up to 2035 using the Long Short-Term Memory (LSTM) deep learning model, which indicated a gradual increase in mean annual temperature, posing potential challenges to urban livability. Based on these projections, the influence of vegetation cover on noise pollution was analyzed using remote sensing data. A vegetation index map was generated and reclassified into five categories, revealing that 47% of the study area lacked vegetation, 28% had sparse cover, 17% moderate, 6% good, and only 2% dense cover. Comparative analysis demonstrated that areas with denser vegetation experienced significantly lower noise levels, while sparsely vegetated or barren zones were exposed to higher acoustic pollution. Furthermore, tree species with high drought tolerance and effective sound absorption, such as Cupressus sempervirens var. pyramidalis, Robinia pseudoacacia, and Myrtus communis, were identified as suitable candidates for planting in traffic corridors and noise-prone urban areas. These findings emphasize the crucial role of urban green spaces in simultaneously mitigating thermal and acoustic stresses. Overall, the study underscores the importance of sustainable urban design through optimal distribution and species selection of vegetation, offering a practical pathway to counteract the adverse effects of climate change while enhancing environmental quality and residents' quality of life.

* Corresponding author: Ahmad Hossayni E-mail address: ahmad_hossayni@pnu.ac.ir

How to cite this article: Hossayni, A., & Karimzadeh Motlagh, Z. (2025). Sustainable Design of Urban Green Spaces for Noise Mitigation under a Climate Adaptation Framework. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(4), 201-229. https://doi.org/10.22067/GEOEH.2025.93302.1570

©2025 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

Rapid urbanization has led to increased noise pollution, primarily from transportation, which negatively affects quality of life, mental health, and physical well-being. Urban vegetation, particularly trees, offers a natural solution to mitigate noise pollution and improve mental health by enhancing green spaces. However, in arid regions, it is crucial to select drought-resistant species to balance the benefits of noise reduction with potential challenges such as allergenic pollen. This study first predicts annual temperature trends using a deep-learning LSTM model, then examines the role of vegetation in reducing noise pollution in Birjand. By integrating environmental data and modeling approaches, the research aims to provide sustainable urban design strategies that address both urban heat and noise pollution. The findings offer recommendations for urban planners on where to expand vegetation and which plant species are most effective in mitigating noise in arid environments.

Study Area

The city of Birjand is located at approximately 32°52′ north latitude and 59°13′ east longitude, covering an area of about 31,700 square kilometers in South Khorasan Province, eastern Iran. With a population of around 266,700, Birjand lies in a region characterized by a dry to semi-arid climate. The city has an average annual temperature of approximately 17.5 °C and receives about 134 mm of precipitation per year.

Material and Methods

In this study, the Long Short-Term Memory (LSTM) deep learning model was employed to predict temperature trends in the study area. Annual temperature data from 2000 to 2024 were collected, normalized using the Min-Max method, and divided into training (70%), validation (15%), and testing (15%) sets. The LSTM model, a type of advanced recurrent neural network (RNN), effectively captured complex temporal patterns and long-term dependencies within the data. Its architecture, comprising memory cells and three key gates (forget, input, and output), enabled robust modeling of long-term climate trends and seasonal fluctuations. Following training, the model was used to forecast annual temperatures through 2035. The results demonstrated high predictive accuracy, as confirmed by low RMSE values, and showed a clear warming trend aligned with observed climate patterns. Additionally, spatial analysis of noise pollution was conducted using GIS and the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method. Field data on sound levels recorded at various times of day (morning, noon, and night) were used to generate detailed noise distribution maps for Birjand, providing insights into spatial variations in environmental noise exposure.

Results and Discussion

To predict temperature variations in the study area, a deep learning approach was adopted. Specifically, the Long Short-Term Memory (LSTM) neural network was employed to analyze the trend of mean temperature changes over the period 2021–2035. The results revealed a clear upward trend in average temperature, with a high coefficient of determination ($R^2 = 0.84$), indicating an estimated annual increase of approximately 0.08°C. The LSTM model was chosen for its proven capability to capture complex temporal dependencies in time-series climate data. Model outputs confirmed the efficiency of LSTM in accurately forecasting temperature trends, closely reflecting inter-annual fluctuations and highlighting a consistent warming trajectory for the region. These findings suggest that the study area is likely to experience noticeable impacts of climate change in the coming years. Throughout the model training process, the Mean Squared Error (MSE) consistently decreased across both training and validation datasets. As the number of training epochs increased, the model's prediction accuracy improved steadily. The sustained reduction in training error, along with a relatively stable error trend in the validation set, indicates effective learning without significant overfitting. Although a slight divergence between training and validation errors was observed in the final stages of training, the difference remained minor, suggesting that the LSTM network successfully captured the underlying temporal patterns in the data. Overall, the results

highlight the robustness and high performance of the LSTM architecture in modeling climate-related time series and in providing reliable predictions of future temperature dynamics.

Spatial analyses indicated that commercial and industrial areas adjacent to busy roads exhibit the highest levels of noise pollution. In contrast, dense tree cover, particularly broad-leaved and coniferous species, significantly reduced unwanted noise levels. Due to their drought resistance and high efficiency in sound absorption, these species were identified as suitable options for planting along urban roads. Ultimately, the study emphasizes that selecting appropriate plant species and implementing smart green space design can simultaneously enhance urban livability, reduce noise pollution, and mitigate the impacts of global warming.

Conclusion

Urban green spaces, especially trees, play a vital role in mitigating noise pollution. This study highlights that proper green space design and the selection of suitable plant species around noisy areas such as streets and industrial sites can significantly reduce noise levels. Integrating green, low-noise land uses into urban development plans is essential for sustainable noise management. It is recommended that future studies leverage remote sensing and deep learning approaches to advance climate change monitoring and enhance urban planning strategies.

جلد ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، ص ۲۲۹-۲۰۱ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.93302.1570 دسترسی آزاد

طراحی پایدار فضای سبز شهری برای کاهش آلودگی صوتی با رویکرد سازگاری اقلیمی

احمد حسینی*[۱]، زینب کریم‌زاده مطلق[۲]

[*۱]استادیار گروه آب و هواشناسی، دانشگاه پیام نور ایران، ایران
[۲]عضو هیئت علمی پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲

تاریخ بازنگری:۱۴۰۴/۰۶/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴

کلمات کلیدی:

فضای سبز شهری

آلودگی صوتی

پایداری شهری

تغییر اقلیم

گونه‌های مقاوم به خشکی

مدل حافظه طولانی-کوتاه‌مدت (LSTM)

چکیده

گرمایش جهانی و پیامدهای فزاینده آن در مناطق شهری خشک، ضرورت اتخاذ راهبردهای جامع در برنامه‌ریزی شهری را آشکار می‌سازد. هدف این پژوهش؛ پیش‌بینی روندهای اقلیمی، ارزیابی نقش پوشش گیاهی در کاهش آلودگی صوتی، شناسایی گونه‌های مقاوم به خشکی و ارائه راهکارهای پایدار برای بهره‌برداری از فضای سبز در شهر بیرجند است. تغییرات دمای سالانه تا سال ۲۰۳۵ با استفاده از مدل یادگیری عمیق حافظه طولانی-کوتاه‌مدت (LSTM) پیش‌بینی گردید که نتایج آن نشان‌دهندهٔ افزایش تدریجی میانگین دمای سالانه و بروز چالش‌هایی در زیست‌پذیری شهری است. بر این اساس، تأثیر پوشش گیاهی بر آلودگی صوتی با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور بررسی شد. نقشهٔ شاخص پوشش گیاهی تهیه و در پنج طبقه باز طبقه‌بندی گردید که نتایج نشان داد ۴۷٪ از محدوده بدون پوشش گیاهی، ۲۸٪ دارای پوشش ضعیف، ۱۷٪ متوسط، ۶٪ خوب و تنها ۲٪ دارای پوشش متراکم است. مقایسهٔ نقشه‌ها بیانگر آن بود که مناطق دارای پوشش متراکم به‌طور معناداری سطوح پایین‌تری از آلودگی صوتی را تجربه می‌کنند، در حالی که نواحی بدون یا با پوشش ضعیف بیشترین میزان نویز را دارند. همچنین گونه‌های مقاوم به خشکی و دارای توانایی جذب صدا نظیر سرو شیرازی (Cupressus sempervirens var. pyramidalis)، اقاقیا (Robinia pseudoacacia) و مورد (Myrtus communis) برای کاشت در معابر و مناطق پر تردد پیشنهاد شدند. یافته‌ها بر اهمیت فضای سبز در کاهش هم‌زمان تنش‌های حرارتی و صوتی تأکید دارد و لزوم طراحی پایدار شهری با توزیع بهینه پوشش گیاهی و انتخاب گونه‌های مناسب را برجسته می‌سازد. این رویکرد می‌تواند در کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم و ارتقای کیفیت زندگی شهروندان نقش مؤثری ایفا کند.

* نویسندهٔ مسئول: احمد حسینی
E-mail: ahmad_hossayni@pnu.ac.ir

مقدمه

رشد شتابان شهرنشینی و گسترش فعالیت‌های حمل‌ونقل، آلودگی صوتی را به یکی از چالش‌های مهم پایداری و سلامت شهری تبدیل کرده است. مواجههٔ مداوم با صداهای بلند، پیامدهایی چون استرس، اختلال خواب و بیماری‌های قلبی- عروقی به همراه دارد (Fallah-Shorshani, Yin, McConnell, Fruin & Franklin, 2022; Chen, He, Yu, Wei & Chen, 2024). در مناطق شهری، عواملی مانند تراکم جمعیت، نابرابری در دسترسی به خدمات و افت کیفیت محیط‌زیست، اهمیت شاخص‌هایی نظیر پوشش گیاهی و وجود فضاهای سبز را دوچندان می‌کند (Mahmoudzadeh, Abedini, Aram & Mosavi, 2024). پوشش گیاهی شهری، به‌عنوان یک راهکار طبیعی و پایدار، توانایی جذب، شکست و پراکندگی امواج صوتی را دارد و می‌تواند محیطی آرام‌تر در مناطق پر تردد ایجاد کند (Reyes-Avila & Baxter, 2024). افزون بر این، حضور فضاهای سبز تأثیر مثبتی بر سلامت روان شهروندان داشته و با کاهش استرس، افزایش حس امنیت و ارتقای فعالیت‌های بدنی، کیفیت زندگی را بهبود می‌بخشد (Yang, Kwan, Liu & Huang, 2025). فضاهای سبز از طریق ارتقاء زیبایی بصری، ایجاد حس امنیت و آرامش، نقش مؤثری در کاهش تأثیرات منفی آلودگی صوتی بر سلامت روان دارند. با این حال، کارایی فضای سبز در کاهش آلودگی صوتی به شدت وابسته به سازگاری گیاهان با شرایط اقلیمی آینده است (Helbich, Hagenauer, Burov & Dzhambov, 2025). پیش‌بینی الگوهای اقلیمی به‌دلیل پیچیدگی تعاملات داده‌های زمانی، مکانی و محیط‌زیستی چالش‌برانگیز است. تحلیل سری‌های زمانی در شناسایی روندهای بلندمدت و نوسانات کوتاه‌مدت متغیرهایی مانند دما، بارش و ترکیب جوّی اهمیت زیادی دارد.

در این پژوهش، سه محور به‌صورت یکپارچه و وابسته به هم بررسی می‌شوند:

۱) پیش‌بینی تغییرات دمای سالانه شهر بیرجند به‌منظور ارزیابی پایداری اقلیمی گونه‌ها؛

۲) تحلیل نقش پوشش گیاهی در کاهش آلودگی صوتی در کاربری‌های پرتردد شهری؛

۳) انتخاب گونه‌های مقاوم به خشکی و گرما که ضمن حفظ سلامت و زیبایی شهری، بیشترین کارایی را در کاهش صدا داشته باشند و کمترین اثرات منفی جانبی را ایجاد کنند.

این رویکرد، با ترکیب مدل‌سازی اقلیمی، ارزیابی زیست‌محیطی و تحلیل مکانی، چارچوبی علمی برای طراحی فضای سبز پایدار در اقلیم‌های خشک فراهم می‌آورد که می‌تواند هم‌زمان به کاهش دما، بهبود کیفیت صوتی و ارتقای زیست‌پذیری شهری کمک کند.

در این پژوهش ابتدا با به‌کارگیری مدل یادگیری عمیق LSTM، روند تغییرات دمای سالانه پیش‌بینی می‌شود و سپس تأثیر پوشش گیاهی به‌ویژه گونه‌های چندمنظوره گرمسیری مقاوم به خشکی بر کاهش آلودگی صوتی در مناطق خشک بررسی می‌گردد. فضاهای سبز شهری و درختان حاشیه‌راه‌ها با جذب و پراکندگی امواج صوتی به‌عنوان عایق طبیعی عمل می‌کنند، اما انتخاب گونه‌ها باید با توجه به سازگاری اقلیمی، توانایی کاهش صدا و کمترین اثرات جانبی (مانند گرده‌های آلرژی‌زا یا آسیب به زیرساخت‌ها) صورت پذیرد. ارائه رویکردی جامع و متعادل برای طراحی شهری پایدار ضروری است تا به طور هم‌زمان خدمات اکوسیستم (خنک‌سازی، تنوع زیستی، سلامت روان) بیشینه و مخاطرات بالقوه به حداقل برسند (Sharafatmandrad & Khosravi Mashizi, 2025). در حال حاضر آلودگی صوتی در مناطق شهری استان خراسان‌جنوبی عمدتاً ناشی از تردد وسایل نقلیه، فعالیت‌های صنفی و صنعتی پر صدا است. اگر چه برخی منابع مانند نیروگاه‌های دیزلی از مدار خارج شده‌اند، ولی این پدیده همچنان یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های زیست‌محیطی شهروندان به شمار می‌آید. پژوهش حاضر با رویکردی تحلیلی و چندرشته‌ای به‌دنبال ارائهٔ راه‌کارهای علمی برای کاهش آلودگی صوتی، پیش‌بینی تغییرات اقلیمی

و ارتقای زیست‌پذیری شهری است. این مطالعه، با تمرکز بر تحلیل مکانی داده‌های محیطی، نقش نوع و تراکم پوشش‌های گیاهی در کاهش شدت آلودگی صوتی در کاربری‌های مختلف شهر بیرجند را ارزیابی می‌کند. هدف نهایی تحقیق، طراحی شهری پایدار و توسعه فضای سبز هوشمند است که با تلفیق داده‌های اقلیمی، مدل‌سازی یادگیری ماشین و تحلیل زیست‌محیطی، ابزار تصمیم‌گیری مؤثری را برای برنامه‌ریزان و طراحان شهری فراهم آورد.

باتوجه به نقش مهم پوشش گیاهی در کاهش آلودگی صوتی شهری و تأثیر تغییرات اقلیمی بر کارایی آن، پژوهش حاضر تلاش می‌کند تا رابطه میان روند گرمایش، ویژگی‌های گونه‌های گیاهی و طراحی پایدار فضای سبز شهری را بررسی کند. در این چارچوب، اهمیت بررسی گونه‌های مقاوم به اقلیم خشک و نحوهٔ جانمایی، ارتفاع و تراکم پوشش گیاهی برای حفظ کارایی صوتی محیط شهری در بلندمدت مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، چارچوب مفهومی پژوهش بر سه فرضیه اصلی استوار است. نخست آن‌که روند افزایشی دمای سالانه در شهر بیرجند می‌تواند کارایی گونه‌های گیاهی را در کاهش آلودگی صوتی تحت تأثیر منفی قرار دهد. دوم آن‌که گونه‌های گیاهی مقاوم به اقلیم خشک در شرایط گرمایش آتی از پایداری بیشتری در عملکرد صوتی برخوردار خواهند بود. سوم آن‌که تراکم، ارتفاع و نوع جانمایی پوشش گیاهی قادر است اثر تغییرات اقلیمی بر کیفیت صوتی محیط شهری را تعدیل کند. در راستای این فرضیات، سؤالات کلیدی پژوهش نیز به شرح زیر مطرح می‌شوند: روند تغییرات دمای سالانه در شهر بیرجند طی سال‌های آینده چگونه پیش‌بینی می‌شود؟ کدام گونه‌های گیاهی در اقلیم خشک بیرجند از نظر سازگاری اقلیمی و عملکرد صوتی مناسب‌تر هستند؟ و در نهایت، چگونه می‌توان با اتکا به داده‌های پیش‌بینی اقلیم، الگویی برای طراحی پایدار فضای سبز شهری ارائه کرد که کارایی صوتی خود را در بلندمدت حفظ کند؟

اهداف اصلی این پژوهش عبارت‌اند از: بررسی نقش پوشش گیاهی، به‌ویژه درختان، در کاهش و جذب آلودگی صوتی شهری؛ شناسایی و انتخاب گونه‌های گیاهی مقاوم به شرایط اقلیم خشک متناسب با شهر بیرجند؛ ارائه راه‌کارهای بهینه برای بهره‌برداری مؤثر از فضای سبز در کنترل آلودگی صوتی؛ و در نهایت پیش‌بینی تغییرات اقلیمی سالانه با بهره‌گیری از مدل‌های یادگیری عمیق (LSTM). در این پژوهش ابتدا با به‌کارگیری مدل یادگیری عمیق LSTM، روند تغییرات دمای سالانه پیش‌بینی می‌شود و سپس تأثیر پوشش گیاهی به‌ویژه گونه‌های چندمنظوره گرمسیری مقاوم به خشکی بر کاهش آلودگی صوتی در مناطق خشک بررسی می‌گردد.

مروری بر ادبیات

مدل‌های یادگیری عمیق[1] به‌ویژه شبکه‌های حافظه طولانی کوتاه‌مدت (LSTM[2]) به دلیل توانایی در درک وابستگی‌های زمانی پیچیده، به‌طور گسترده در پیش‌بینی داده‌های اقلیمی به کار گرفته شده‌اند (Munandar & Surbakti, 2025). افزایش دمای زمین به‌ویژه در مناطق خشک، علاوه بر پیامدهای زیست‌محیطی، کیفیت زندگی شهروندان را نیز به‌طور معناداری کاهش می‌دهد. شکل ۱ بر اهمیت حیاتی پیش‌بینی تغییرات اقلیمی تأکید دارد (Madhavi et al., 2024). در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی و آلودگی صوتی به دو چالش جدی زیست‌محیطی با تأثیرات گسترده بر سلامت روانی و جسمی انسان‌ها تبدیل شده‌اند. در این میان، بهره‌گیری هوشمندانه از پوشش گیاهی در طراحی شهری می‌تواند راه‌کاری مؤثر برای کاهش دمای شهری و کاهش آلودگی صوتی باشد.

1-Deep Learning
2- Long/Short Term Memory (LSTM)



شکل ۱- اهمیت و نقش کلیدی پیش‌بینی تغییرات اقلیم

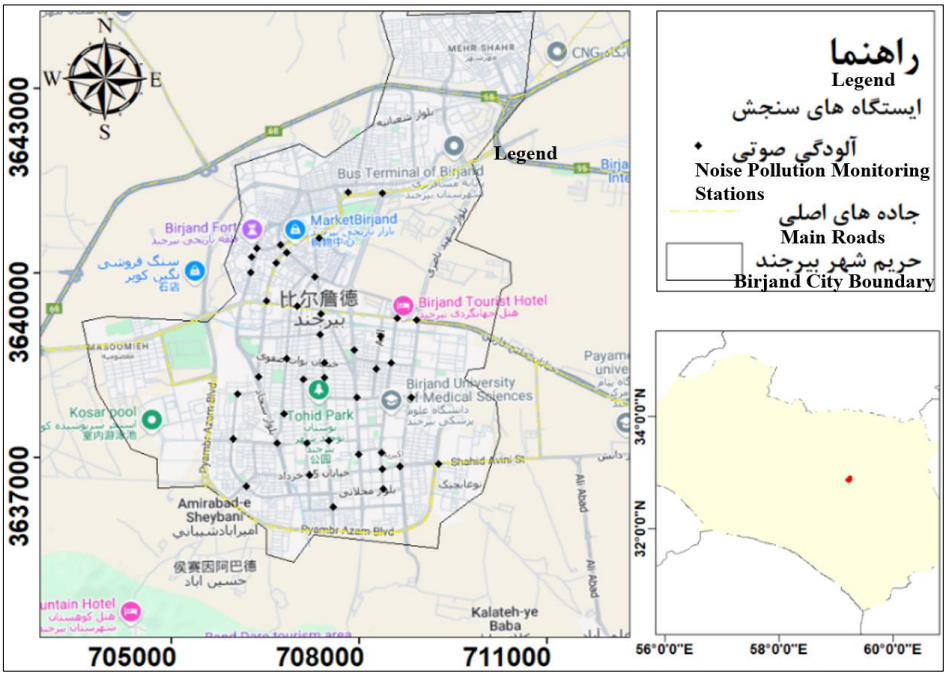
Fig.1. The Importance and Key Role of Climate Change Prediction (Madhavi et al., 2024)

فضای سبز می‌تواند به‌عنوان یک بافر مؤثر در برابر فشارهای محیطی عمل کند. با توجه به پیچیدگی عوامل مؤثر، بهره‌گیری از رویکردهای نوین مدل‌سازی شامل الگوریتم‌های یادگیری ماشین (ML) ضرورت یافته است. در سال‌های اخیر، رویکردهای مبتنی بر الگوریتم‌های ML نظیر شبکه‌های عصبی (NN) به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. این روش‌ها با اتکا بر داده‌های مکانی و محیطی، امکان تحلیل‌های پیچیده‌تر و پیش‌بینی‌های دقیق‌تر را فراهم کرده‌اند (Helbich et al., 2025; Razavi-Termeh, Sadeghi-Niaraki, Yao, Naqvi & Choi, 2024).

پوشش گیاهی نقش مؤثری در کاهش دمای شهری و کاهش آلودگی صوتی ایفا می‌کند. مدل‌های یادگیری عمیق مانند LSTM برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی کاربرد دارند. با این حال، تحقیقات هم‌زمان در زمینه نوسانات دما و تأثیر گیاهان بر آلودگی صوتی در مناطق خشک محدود است. نیاس (Nias, 2021) با استفاده از GIS و داده‌های صوتی ایستگاه‌ها، ارتباط کاربری اراضی در شیراز و آلودگی صوتی را مدل‌سازی و الگوهای فضایی آن را شناسایی کرد. نتایج این پژوهش برای مدیریت شهری و طراحی فضاهای سبز مفید است. پژوهش ارسلان و همکاران (Arsalan, Chamani & Zamani-Ahmadmahmoodi, 2024) نشان می‌دهد که طراحی بهینه و مکان‌یابی هدفمند این فضاها در مجاورت منابع صوتی تأثیر چشمگیری بر بهبود کیفیت صوتی محیط دارد. چن و همکاران (Chen et al., 2024) با تأکید بر تحلیل همبستگی بین قرارگیری در معرض آلودگی صوتی و ویژگی‌های شهری، چارچوبی برای تدوین سیاست‌های مبتنی بر طبیعت به منظور کاهش آلودگی و ارتقاء تاب‌آوری و زیست‌پذیری شهرها ارائه کرده‌اند. پژوهش یانگ و همکاران (Yang et al., 2025) نشان می‌دهد که آلودگی صوتی سلامت روان را تضعیف و استفاده از فضاهای سبز و فعالیت بدنی را کاهش می‌دهد. گنجی‌راد و همکاران (Ganjirad, Delavar, Bagheri & Azizi, 2025) بر توسعه چارچوب‌های نوین مکان‌یابی و طراحی فضاهای سبز با توجه به شاخص‌های اجتماعی و زیست‌محیطی تأکید دارند. پارک‌ها، درختان خیابانی و بام‌های سبز با جذب و پراکندگی امواج صوتی، به‌عنوان موانع طبیعی عمل کرده و شدت آلودگی صوتی را بر اساس نوع پوشش، تراکم، ارتفاع و محل قرارگیری کاهش می‌دهند.

منطقهٔ مورد مطالعه

شهر بیرجند با جمعیتی بالغ بر ۲۶۶,۷۰۰ نفر و وسعتی در حدود ۳۱۷۰۰ کیلومترمربع در منطقه‌ای با اقلیم خشک و نیمه‌خشک واقع شده است. در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۵۲ دقیقهٔ شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۱۳ دقیقهٔ شرقی واقع شده است (Statistical Center of Iran, 2020). میانگین دمای سالانهٔ این شهر حدود ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه آن نزدیک به ۱۳۴ میلی‌متر گزارش شده است (Iran MeteorologicalOrganization, 2020). در چنین شرایطی، طراحی و توسعه فضای سبز شهری نقش مهمی در ارتقاء کیفیت زیست‌محیطی دارد. با توجه به محدودیت منابع آبی و شدت تبخیر، استفاده از گونه‌های گیاهی مقاوم به خشکی در اولویت برنامه‌های مدیریت شهری قرار دارد. محدوده مطالعاتی در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- نقشهٔ موقعیت منطقهٔ مطالعاتی

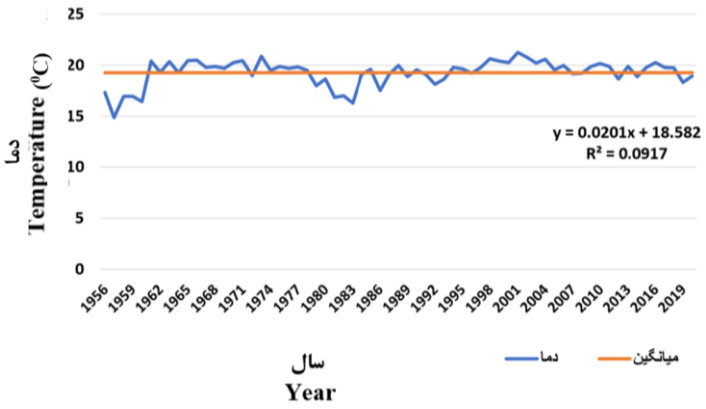
Fig.2. Map of the Study Area

مواد و روش‌ها

تهیهٔ داده‌ها

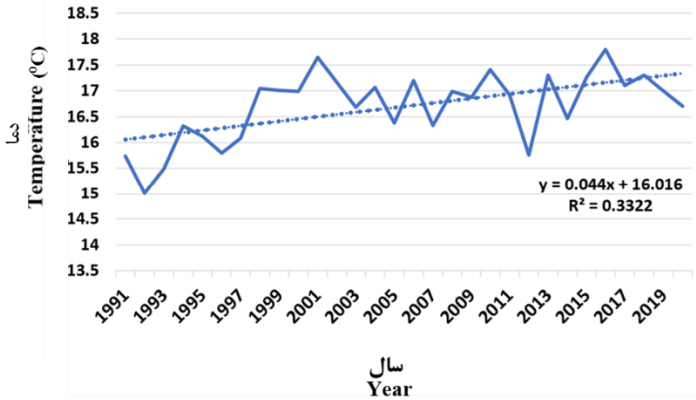
در گام نخست، داده‌های دمایی ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان جنوبی و شهر بیرجند در بازه زمانی ۱۹۵۶ تا ۲۰۲۰ گردآوری شد (Iran Meteorological Organization, 2020). این داده‌ها شامل میانگین سالانه دما بوده و از منابع معتبر هواشناسی ملی استخراج گردید. داده‌ها پس از بررسی کیفیت و حذف مقادیر پرت، برای تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی آماده شدند. این مجموعه داده، پایه‌ای برای بررسی روندهای بلندمدت تغییرات دمایی و شبیه‌سازی‌های اقلیمی فراهم نمود. اشکال ۳ و ۴ روند تغییرات میانگین سالیانه دما را در دوره‌های زمانی مختلف ارائه می‌دهند. شکل ۳ نوسانات دما از سال ۱۹۵۶ تا ۲۰۱۹ را در کلیه ایستگاه‌های سینوپتیک استان نشان می‌دهد. شکل ۴ به‌طور ویژه به تغییرات میانگین دمای سالیانه

ایستگاه سینوپتیک بیرجند طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۹ می‌پردازد. این نمودارها امکان بررسی روندهای اقلیمی منطقه و شناسایی اثرات بلندمدت گرمایش را فراهم می‌سازند.



شکل ۳- میانگین سالیانه دما در ایستگاه‌های سینوپتیک خراسان جنوبی

Fig. 3. Annual Average Temperature at Synoptic Stations in South Khorasan



شکل ۴- میانگین سالیانهٔ دما در ایستگاه سینوپتیک بیرجند

Fig. 4. Annual Average Temperature at Birjand Synoptic Station

پیش‌پردازش داده‌ها

این مطالعه با هدف پیش‌بینی روند دما در منطقه مطالعاتی از مدل LSTM استفاده کرده است. داده‌های دمای سالانه از ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ با استفاده از روش نرمال‌سازی Min-Max استانداردسازی شدند. سپس داده‌ها به سه مجموعه آموزش (۷۰٪)، اعتبارسنجی (۱۵٪) و آزمون (۱۵٪) تقسیم شدند. با استفاده از پنجره‌های متحرک، توالی‌های زمانی برای پیش‌بینی تغییرات دما ایجاد شدند. شکل ۵ فرایند پردازش داده‌های زمانی را نشان می‌دهد.



شکل ۵- فرایند پردازش داده‌های دمای سطح زمین، از جمله پیش پردازش، مدل‌سازی، و پیش‌بینی

Fig. 5. Processing workflow of land surface temperature (LST) data, including preprocessing, modeling, and prediction

مدل‌سازی با شبکه عصبی LSTM

مدل LSTM به‌عنوان یک شبکهٔ عصبی بازگشتی پیشرفته، با استفاده از «سلول حافظه» و دروازه‌های ورودی، فراموشی و خروجی، توانایی مدل‌سازی روابط پیچیده و وابستگی‌های بلندمدت را دارد و برای پیش‌بینی دقیق روندها و تغییرات اقلیمی مناسب است (GR & Adarsh, 2025). برای مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات دمای سالانه، شبکهٔ عصبی بازگشتی LSTM به‌کار گرفته شد. این شبکه قادر است روابط پیچیده و وابستگی‌های بلندمدت سری‌های زمانی را شناسایی کند و از مشکلاتی مانند ناپایداری گرادیان یا فراموشی اطلاعات جلوگیری نماید.

طراحی معماری مدل LSTM برای پیش‌بینی روند تغییرات دمای سالانه

معماری و پارامترهای مدل به‌گونه‌ای طراحی شد که توانایی مدل در شناسایی وابستگی‌های زمانی بلندمدت و پیش‌بینی دقیق دما به حداکثر برسد. معماری مدل شامل دو لایه متوالی LSTM با ۵۰ نورون در هر لایه است که به‌طور ویژه برای استخراج الگوهای پیچیده و غیرخطی در داده‌های سری‌زمانی انتخاب شده‌اند. در انتهای شبکه، یک لایه خروجی تک‌نورونی با تابع فعال‌سازی خطی قرار دارد که مقدار دمای پیش‌بینی‌شده را به صورت عددی تولید می‌کند. نرخ یادگیری مدل برابر با ۰/۰۰۱ تنظیم شد تا فرآیند یادگیری با سرعت بهینه و پایداری گرادیان انجام گیرد. آموزش مدل طی ۱۵۰ اپک صورت گرفت و بهینه‌سازی وزن‌ها با استفاده از الگوریتم Adam انجام شد که برای داده‌های سری‌زمانی کارایی بالایی دارد. جزئیات کامل معماری و پارامترهای مدل در جدول ۱ ارائه شده است. برای پیاده‌سازی و اجرای مدل از نرم‌افزار Python استفاده شد. برای ارزیابی عملکرد، از دو معیار کلیدی میانگین مربعات خطا (MSE) و ضریب تعیین (R^2) استفاده گردید تا دقت و قابلیت تبیین مدل به‌طور کمی سنجیده شود. به‌منظور جلوگیری از بیش‌برازش، تکنیک Dropout بین لایه‌ها و منظم‌سازی L2 به کار گرفته شد که به مدل کمک می‌کند تعمیم‌پذیری بالاتری در مواجهه با داده‌های جدید داشته باشد.

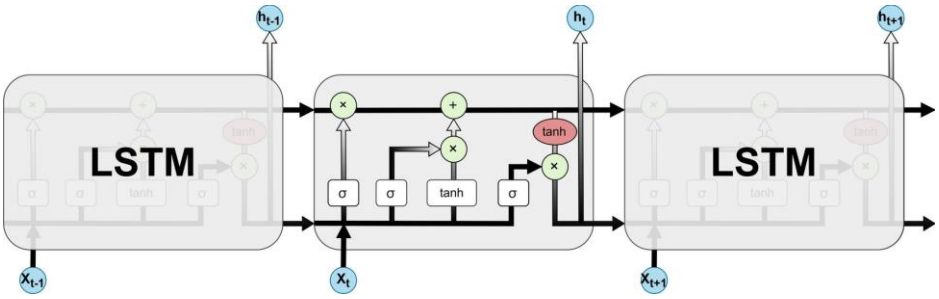
این مدل به دلیل قابلیت ذخیره و به‌روزرسانی انتخابی اطلاعات در طول بازه‌های زمانی طولانی، گزینه‌ای مناسب برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی محسوب می‌شود. معماری مدل به گونه‌ای طراحی شد که ابتدا چندین لایه LSTM متوالی، ویژگی‌ها و الگوهای نهان در داده‌ها را استخراج نموده و سپس خروجی این لایه‌ها به لایه‌های کاملاً متصل منتقل شود. در نهایت، یک لایه خروجی با یک نورون و تابع فعال‌سازی خطی، مقدار پیش‌بینی‌شده دمای سالانه را تولید کرد. مدل آموزش‌یافته برای پیش‌بینی میانگین دمای سالانه تا سال ۲۰۳۵ به کار گرفته شد. هدف از این پیش‌بینی، ارزیابی روندهای احتمالی تغییرات اقلیمی در منطقه و تحلیل سناریوهای گرمایش بلندمدت می‌باشد. ساختار عملکرد این مدل در شکل ۶ به‌صورت شماتیک نمایش داده شده است (Guo & Feng, 2024).

جدول ۱- تنظیمات، مشخصات و پارامترهای مدل LSTM

Table 1– Settings, Specifications and Parameters of the LSTM Model

پارامتر Parameter	مقدار Value
تعداد لایه‌های LSTM Number of LSTM layers	۲ لایه متوالی 2 stacked layers
نورون هر لایه Neurons per layer	50
لایه خروجی Output layer	۱ نورون (تابع فعال‌سازی خطی) 1 neuron (linear activation)
نرخ یادگیری	0.001

Learning rate تعداد دوره‌ها Epochs	150
الگوریتم بهینه‌سازی Optimization algorithm	Adam
معیار ارزیابی Evaluation metrics	MSE, MAE, R^2
تکنیک جلوگیری از بیش‌برازش Overfitting prevention	L2 و Dropout



شکل ۶- لایهٔ شبکه عصبی LSTM و ساختار داخلی آن

Fig.6. LSTM Neural Network Layer and Its Internal Structure (Guo & Feng, 2024)

مدل حافظهٔ طولانی ـ کوتاه‌مدت (LSTM)، یکی از پیشرفته‌ترین مدل‌های شبکهٔ عصبی است که به‌طور خاص برای مدل‌سازی سری‌های زمانی با وابستگی‌های بلندمدت طراحی شده است. این ویژگی‌ها، LSTM را به ابزاری بسیار مؤثر برای پیش‌بینی دما و تحلیل تغییرات اقلیمی تبدیل می‌کند، زیرا تغییرات اقلیمی به طور طبیعی با وابستگی‌های زمانی پیچیده‌ای همراه است و معمولاً روندهای غیرخطی و بلندمدت را در برمی‌گیرد. LSTM از یک ساختار به نام «بلوک حافظه» استفاده می‌کند که مسئول ذخیره و به‌روزرسانی اطلاعات در طول زمان است. این بلوک حافظه شامل سه دروازه اصلی است که هر یک نقش خاصی در پردازش اطلاعات دارند: دروازه فراموشی[1]، دروازه ورودی[2] و دروازه خروجی[3].

دروازه فراموشی: این دروازه تصمیم می‌گیرد که کدام اطلاعات از گذشته باید از وضعیت سلولی حذف شود. این فرآیند با استفاده از رابطه (۱) ارائه شده در جدول ۲ انجام می‌شود که در این رابطه W_f بیانگر وزن، $h_{(t-1)}$ بیانگر حالت مخفی قبلی، x_t بیانگر ورودی کنونی و b_f بیانگر بایاس است.

دروازهٔ ورودی: این دروازه مشخص می‌کند که کدام اطلاعات جدید به وضعیت سلولی اضافه می‌شود. این فرآیند از دو مرحله تشکیل می‌شود. اولین مرحله، دروازهٔ ورودی است که تصمیم می‌گیرد کدام مقدار باید به‌روزرسانی شود. در مرحله بعد، مقدار پیشنهادی برای اضافه شدن به وضعیت سلولی محاسبه می‌شود. وضعیت سلولی C_t با ترکیب اطلاعات قبلی و جدید به‌روزرسانی می‌شود. این به‌روزرسانی کمک می‌کند که مدل اطلاعات مربوط به گذشته و حال را به‌طور مؤثر ذخیره و پردازش کند. رابطه (۲) بیانگر دروازه ورودی و رابطه‌های (۳) و (۴) بیانگر بردار کاندیدهای جدید می‌باشد.

1- Forget Gate
2- Input Gate
3- Output Gate

دروازهٔ خروجی: در نهایت، دروازهٔ خروجی تصمیم می‌گیرد که چه بخشی از وضعیت سلولی به‌عنوان خروجی مدل به بیرون ارسال شود. سپس، خروجی نهایی مدل محاسبه می‌شود که در آن، h_t خروجی نهایی مدل است که به‌طور معمول به‌عنوان پیش‌بینی دما یا سایر شاخص‌های اقلیمی استفاده می‌شود. برای تعیین حالت مخفی ابتدا دروازهٔ خروجی متناسب با ورودی کنونی و حالت مخفی به دست می‌آید که رابطه (۵) بیانگر این خروجی است. حالت مخفی تابعی از خروجی حاصل شده و حالت سلول است (رابطه ۶) (Vo, Kim, Nguyen & Bae, 2023).

در این پژوهش معماری پایه مدل در شکل ۷ نمایش داده شده است و نمایی کلی از اجزای داخلی و فرآیند جریان اطلاعات در ساختار شبکه را ارائه می‌دهد. این معماری شامل لایه‌هایی از سلول‌های حافظهٔ طولانی کوتاه‌مدت (LSTM) است که به‌عنوان هستهٔ اصلی مدل در تحلیل سری‌های زمانی، نظیر پیش‌بینی دما، به کار گرفته می‌شوند. ساختار داخلی هر سلول LSTM از سه دروازهٔ اصلی، شامل دروازهٔ فراموشی، دروازهٔ ورودی و دروازهٔ خروجی تشکیل شده است. این دروازه‌ها با استفاده از توابع فعال‌سازی سیگموئید و تانژانت هیپربولیک (tanh)، جریان اطلاعات را تنظیم کرده و به شبکه امکان می‌دهند تا وابستگی‌های زمانی بلندمدت را به‌طور مؤثر شناسایی و ذخیره کند. در ابتدای هر گام زمانی، ورودی فعلی (x_t) و وضعیت پنهان قبلی (h_{t-1}) به سلول وارد می‌شوند. دروازهٔ فراموشی تصمیم می‌گیرد چه بخش‌هایی از حافظهٔ قبلی (C_{t-1}) حذف شوند. سپس، دروازهٔ ورودی مشخص می‌کند که چه اطلاعات جدیدی وارد حافظه شود و مقادیر جدید با استفاده از تابع tanh تولید می‌گردند. این مقادیر با هم ترکیب شده و حافظهٔ سلولی جدید (C_t) را تشکیل می‌دهند. در ادامه، دروازهٔ خروجی با بهره‌گیری از خروجی tanh و سیگموئید، وضعیت پنهان جدید (h_t) را تولید می‌کند که به گام زمانی یا لایه‌ی بعدی منتقل می‌شود.

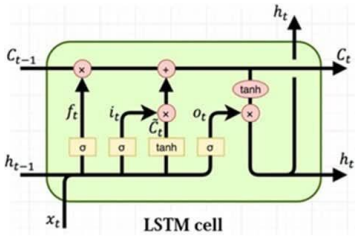
در این پژوهش برای افزایش کارایی مدل، چندین لایه‌ی LSTM به‌صورت متوالی طراحی شده‌اند تا الگوهای پیچیده و وابستگی‌های زمانی در سری‌های دمایی را استخراج کنند. خروجی هر لایه به‌عنوان ورودی لایه‌ی بعدی عمل می‌کند. در پایان، این ویژگی‌های استخراج‌شده به لایه‌های کاملاً متصل انتقال می‌یابند تا در نهایت مقدار دمای پیش‌بینی‌شده تولید گردد. درون هر سلول، از تابع فعال‌سازی تانژانت هیپربولیک برای تسریع همگرایی و شبیه‌سازی روابط غیرخطی استفاده شده است. برای مقابله با پدیدهٔ بیش‌برازش[1]، از تکنیک dropout بین لایه‌ها و منظم‌سازی L2 روی وزن‌ها استفاده شد تا توانایی تعمیم مدل نسبت به داده‌های جدید افزایش یابد. الگوریتم آدام[2] به‌عنوان روش بهینه‌سازی به کار رفته و معیار میانگین مربعات خطا[3] برای ارزیابی دقت پیش‌بینی به‌کار گرفته شد. ورودی‌های مدل نیز شامل مقادیر تأخیری[4] متغیرهای اقلیمی مانند (دمای گذشته و...) هستند. این طراحی جامع، چارچوبی قدرتمند برای تحلیل دقیق روابط زمانی و مکانی مؤثر بر دمای لحظه‌ای و پیش‌بینی آینده آن فراهم می‌کند.

1- Overfitting
2- Adam
3- MSE
4- Lagged

جدول ۲ – معادلات اصلی مدل LSTM و شاخص ارزیابی

Table 2– Key Equations of the LSTM Model and Evaluation Index

معادله Equation	شماره معادله number
$i_t = \sigma\,(W_i \,.\, [h_{(t-1)}, x_t] + b_i)$	(1)
$C\hat{}_t = \tanh\,(W_C \,.\, [h_{(t-1)}, x_t] + b_C)$	(2)
$C\hat{}_t = \tanh\,(W_C \,.\, [h_{(t-1)}, x_t] + b_C)$	(3)
$C_t = f_t \,.\, C_{(t-1)} + i_t \,.\, C\hat{}_t$	(4)
$o_t = \sigma\,(W_O \,.\, [h_{(t-1)}, x_t] + b_O)$	(5)
$h_t = o_t * \tanh\,(C_t)$	(6)
$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{T=1}^{N}(y_t - \hat{y}_t)^2}$	(7)



شکل ۷– ساختار داخلی سلول LSTM و نحوه‌ی جریان اطلاعات بین اجزای آن

Fig.7. Internal Structure of the LSTM Cell and information flow Between Its Components

ارزیابی و اعتبارسنجی مدل

پس از آموزش کامل مدل، داده‌های پیش‌بینی برای سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۳۵ تولید شدند. سپس نمودارهای مقایسه‌ای بین خروجی مدل و روند واقعی، به همراه تحلیل خطا، ارائه شدند. نتایج نشان‌دهندهٔ توانایی قابل توجه هر دو ساختار در بازتولید روندهای اقلیمی و آشکارسازی ناهنجاری‌های احتمالی می‌باشد. برای ارزیابی دقت مدل مطابق رابطه (۷) ارائه شده در جدول ۲، از معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد که در آن N تعداد مشاهدات در مجموعه آزمون است. این معیارها دقت پیش‌بینی مدل را در مقایسه با مقادیر واقعی نشان می‌دهند (Gupta et al., 2024).

برای ارزیابی دقت مدل، علاوه بر نمودار میانگین مربعات خطا (MSE)، معیارهای عددی RMSE و MAE نیز محاسبه شدند تا دقت پیش‌بینی‌ها به صورت کمی مشخص گردد. با توجه به واحد داده‌ها (درجه سانتی‌گراد) و دامنهٔ تغییرات سالانه دما، خطاهای RMSE کمتر از ۱ درجه نشان‌دهنده پیش‌بینی‌های دقیق و قابل قبول هستند. به منظور کالیبراسیون مدل و افزایش دقت پیش‌بینی‌ها، از روش اعتبارسنجی متقابل حذف یکی - یکی (LOOCV) استفاده شد؛ در این روش هر بار یک نمونه از داده‌ها به عنوان مجموعهٔ تست جدا می‌شود و باقی داده‌ها برای آموزش مدل به کار می‌روند. این فرآیند برای تمامی نمونه‌ها تکرار شد، سپس RMSE و MAE بر اساس پیش‌بینی‌های تمام نمونه‌ها محاسبه گردید.

تحلیل فضایی آلودگی صوتی

با بهره‌گیری از GIS و مدل‌های آماری، امکان شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات آلودگی صوتی در سطوح مختلف منطقهٔ مطالعاتی فراهم آمده است. برای تهیهٔ نقشه‌های توزیع مکانی تراز آلودگی صوتی در شهر بیرجند، از داده‌های میدانی گردآوری شدهٔ پژوهش صیادی و موفق (Sayadi & Movafagh, 2014) استفاده شد. این داده‌ها شامل میانگین تراز صوتی (dB) ثبت‌شده در ۴۳ ایستگاه اندازه‌گیری طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۲ و در سه بازه زمانی مجزا (صبح، ظهر و شب) بوده و به همراه مختصات دقیق مکانی هر ایستگاه، مبنای تحلیل مکانی قرار گرفتند. در مرحله بعد، داده‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS وارد شده و با استفاده از ابزار Spatial Analyst، تکنیک درون‌یابی وزنی معکوس فاصله (IDW) به‌منظور تولید لایه‌های پیوسته تراز صوت به‌کار گرفته شد. در این روش، مقادیر صوتی نقاط نامشخص با توجه به فاصله آن‌ها از ایستگاه‌های اندازه‌گیری و بر اساس تابع وزن‌دهی معکوس فاصله تخمین زده می‌شود، به‌طوری‌که نقاط نزدیک‌تر تأثیر بیشتری بر مقدار نهایی دارند (Li & Heap, 2008). در نتیجه این فرآیند، سه نقشهٔ درون‌یابی‌شده مجزا برای بازه‌های زمانی مختلف به‌دست آمد که امکان تحلیل فضایی دقیق از وضعیت و تغییرات آلودگی صوتی در سطح منطقه مورد بررسی را فراهم ساخت. بر اساس داده‌های موجود، محدوده‌های مجاز صدا به شرح جدول ۳ است.

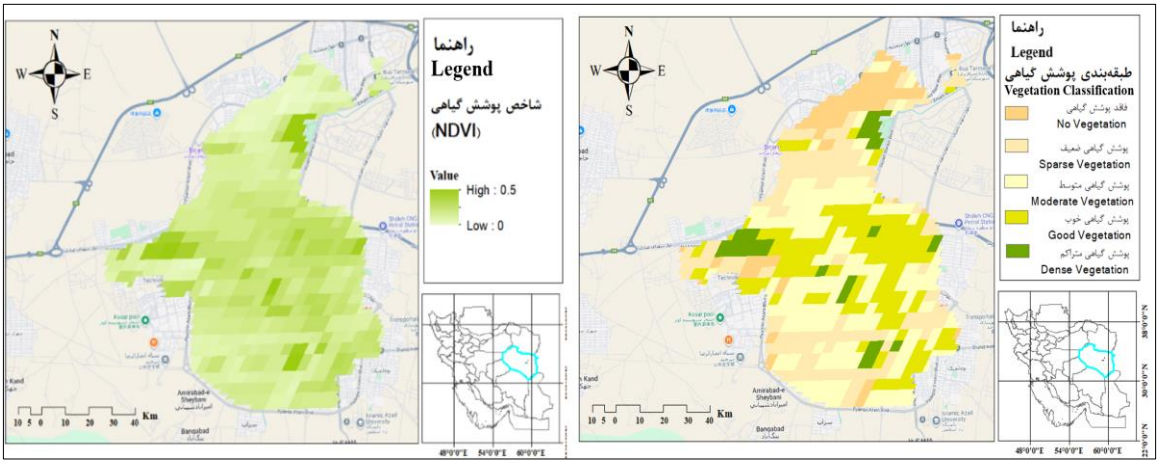
جدول ۳- حدود مجاز صدا در هوای آزاد ایران

Table 3– Permissible Noise Limits in Open Air of Iran (Sayadi & Movafagh, 2014)

نوع منطقه Zone Type	روز (۷ صبح تا ۱۰ شب) Day (7:00 AM – 10:00 PM)	شب(۱۰ شب تا ۷ صبح) Night (10:00 PM – 7:00 AM)
مسکونی Residential	55 dB	45 dB
تجاری – مسکونی Commercial–Residential	60 dB	50 dB
تجاری Commercial	65 dB	55 dB
مسکونی – صنعتی Residential–Industrial	70 dB	60 dB
صنعتی Industrial	75 dB	65 dB
بیمارستان‌ها Hospitals	45 dB	30 dB

تحلیل پوشش گیاهی و ارتباط آن با آلودگی صوتی

در این پژوهش، نقش پوشش گیاهی در کاهش آلودگی صوتی با بهره‌گیری از داده‌های میدانی و سنجش‌ازدور مورد تحلیل قرار گرفت. بدین منظور داده‌های شاخص پوشش گیاهی MODIS (محصول MOD13Q1) از سامانه Earthdata دریافت و برای منطقهٔ مطالعاتی پردازش شد. این داده‌ها به دلیل دسترسی معتبر، کیفیت پردازش‌شده و قابلیت ارائه شاخص NDVI در مقیاس منطقه‌ای، امکان تهیه نقشه‌های شدت و توزیع مکانی پوشش گیاهی را فراهم می‌سازند. مقادیر NDVI در پنج طبقه باز طبقه‌بندی گردید و بر این اساس نقشه‌های شدت و پراکنش پوشش گیاهی (شکل ۸) تولید شد. در ادامه، داده‌های مرتبط با شدت و توزیع آلودگی صوتی گردآوری و نقشه‌های مربوطه تهیه گردید و سپس با استفاده از روش هم‌پوشانی (Overlay Analysis) در محیط GIS، ارتباط میان تراکم و توزیع پوشش گیاهی با آلودگی صوتی مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۸ – نقشه‌های شدت و پراکنش پوشش گیاهی

Fig. 8. Maps of Vegetation Density and Distribution

نتایج و بحث

نتایج پیش‌بینی، ارزیابی و اعتبارسنجی مدل LSTM

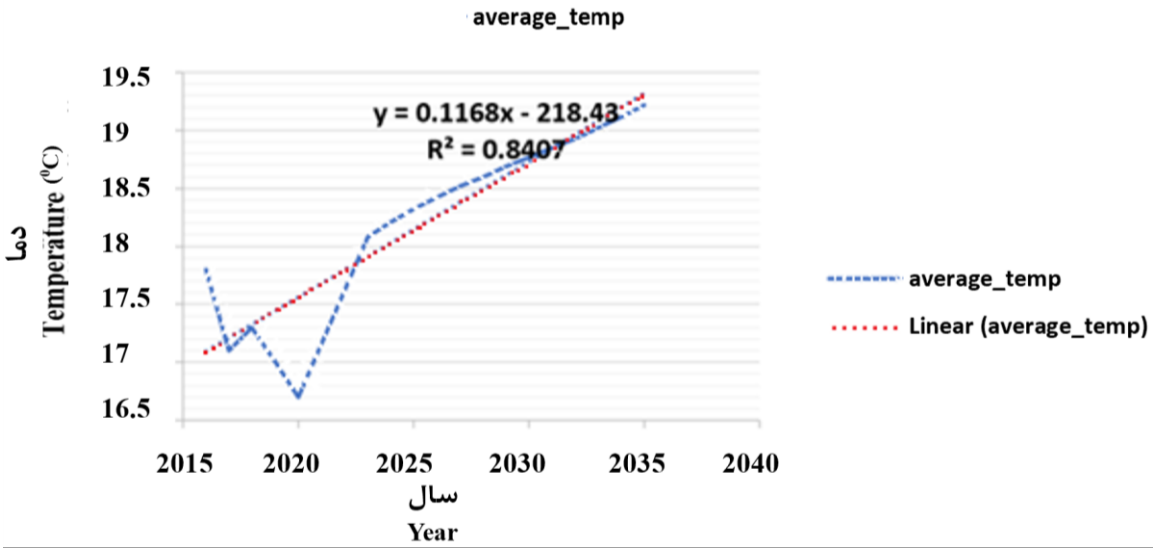
به‌منظور پیش‌بینی تغییرات دمایی در منطقهٔ مورد مطالعه، از مدل‌سازی آماری و یادگیری عمیق استفاده شد. در بخش نخست، یک مدل رگرسیون خطی ساده برای بررسی روند تغییرات میانگین دما طی بازهٔ زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۳۵ پیاده‌سازی شد. نتایج این مدل نشان داد که میانگین دما با ضریب تعیین بسیار بالا ($R^2 = 0.84$) دارای روندی افزایشی است، به‌طوری‌که شیب خط رگرسیون بیانگر افزایش سالانهٔ دما به میزان تقریباً ۰/۰۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. برای تحلیل دقیق‌تر و به‌کارگیری قابلیت‌های مدل‌های یادگیری عمیق در شناسایی الگوهای زمانی پیچیده، از شبکهٔ عصبی LSTM استفاده شد. نتایج مدل نشان‌دهندهٔ دقت بالا در پیش‌بینی مقادیر دمایی بود و روندی مشابه مدل خطی را با تطابق بهتر در نوسانات بین‌سالی نشان داد. این نتایج بر اهمیت بهره‌گیری از روش‌های نوین یادگیری ماشین در تحلیل تغییرات اقلیمی و افزایش دقت پیش‌بینی‌ها تأکید دارد. نتایج حاصل از مدل (شکل ۹)، نشان‌دهندهٔ تداوم روند افزایشی دما بوده و حاکی از گرم‌تر شدن منطقه در سال‌های آتی است.

در شکل ۱۰، روند تغییرات میانگین مربعات خطا (MSE) در مراحل مختلف آموزش مدل LSTM برای هر دو مجموعه دادهٔ آموزشی[1] و اعتبارسنجی[2] ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار خطا در هر دو مجموعه با افزایش تعداد مراحل آموزش[3] روندی نزولی را طی کرده و مدل به‌تدریج به دقت بهتری دست می‌یابد. با پیشرفت فرآیند یادگیری، کاهش پیوسته‌ای در مقدار MSE مشاهده می‌شود؛ به‌ویژه در مجموعهٔ آموزشی که در انتهای فرآیند آموزش به مقداری کمتر از ۱ می‌رسد. نکته قابل توجه، پایداری نسبی روند کاهش خطا در مجموعه‌ی اعتبارسنجی است که نشان‌دهندهٔ عدم بیش‌برازش قابل‌توجه در مدل است.

1- Training
2- Validation
3- Training Steps

هرچند در مراحل انتهایی آموزش، خطای مجموعهٔ اعتبارسنجی به‌طور جزئی از خطای مجموعهٔآموزشی فاصله گرفته، اما این اختلاف چندان زیاد نبوده و حاکی از این است که مدل LSTM قادر به یادگیری مؤثر الگوهای زمانی موجود در داده‌ها بوده است. این روند، کارایی بالای معماری این شبکه در مدل‌سازی روابط پیچیده و وابسته به زمان را به‌خوبی تأیید می‌کند.

نتایج ارزیابی عملکرد پیش‌بینی مدل نشان داد که مدل LSTM کالیبره شده با LOOCV دارای RMSE برابر با ۰/۶۳ و MAE برابر با ۰/۵۲ است. بنابراین پیش‌بینی‌های مدل کالیبره شده از دقت بالایی برخوردارند و با مقادیر مشاهداتی مطابقت مناسبی دارند.



شکل ۹- پیش‌بینی دما تا سال ۲۰۳۵ با استفاده از مدل LSTM

Fig. 9. Temperature Prediction Until 2035 Using the LSTM Model



شکل ۱۰- منحنی یادگیری مدل LSTM بر اساس خطای میانگین مربعات (MSE)

Fig. 10. LSTM Model Learning Curve Based on Mean Squared Error (MSE)

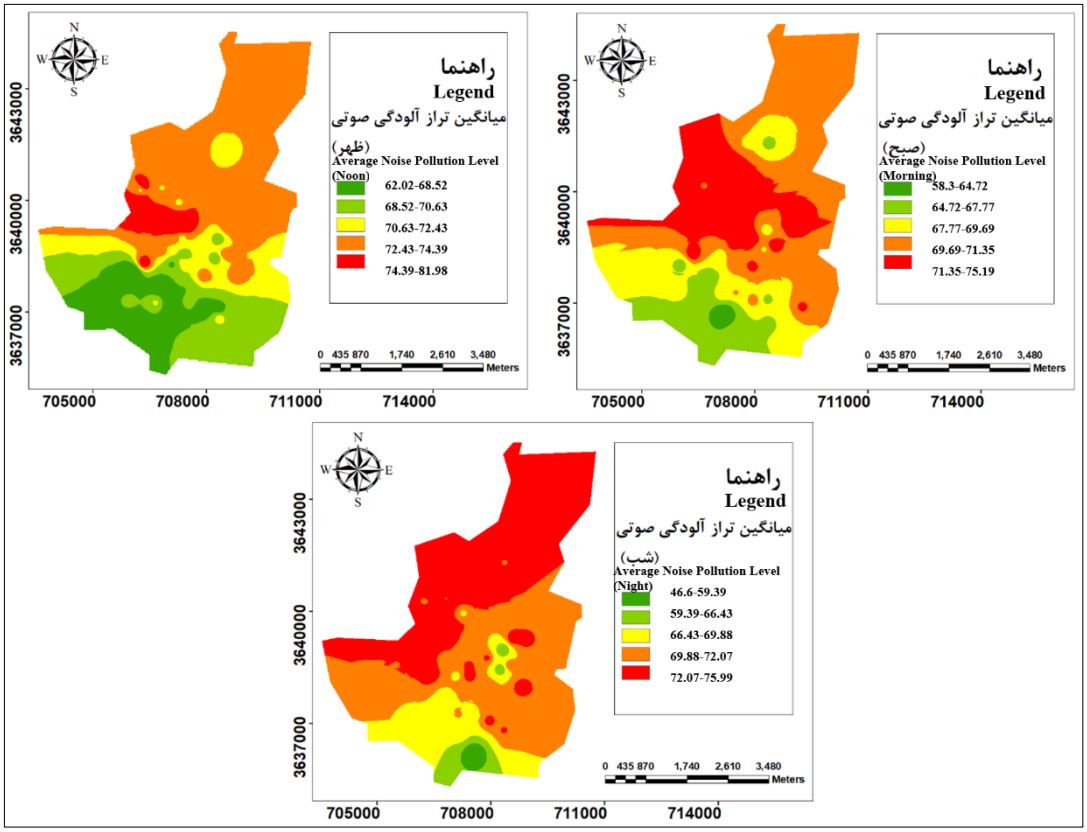
نتایج تحلیل فضایی آلودگی صوتی

نتایج نقشه‌های درون‌یابی (شکل ۱۱)، نشان داد که شدت آلودگی صوتی در ساعات مختلف روز دارای الگوهای مکانی متفاوت است. در ساعات صبح، مناطق جنوبی و جنوب‌غربی (مانند خیابان معلم) آلودگی صوتی کمتری دارند (۵۸ تا ۶۵ دسی‌بل)، در حالی که مناطق مرکزی و شمالی (مانند خیابان شهدا و خیابان امام رضا) با سطوح بالاتری از آلودگی صوتی مواجه هستند. در ساعات ظهر، شدت آلودگی در نواحی مرکزی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد و برخی مناطق به بیش از ۷۴ دسی‌بل می‌رسند، که به ترافیک و فعالیت‌های روزانه مربوط می‌شود. در شب، برخی مناطق جنوبی همچنان آرام باقی می‌مانند، اما بخش‌های شمالی و مرکزی به دلیل تداوم تردد وسایل نقلیه و فعالیت‌های شبانه با افزایش قابل توجه آلودگی صوتی روبه‌رو هستند. خیابان‌هایی مانند عدالت، خیابان طالقانی و کوچه انقلاب از نقاط با بیشترین تراز صوتی (محدوده ۷۲ تا بیش از ۷۶ دسی‌بل) هستند. نتایج این مطالعه به توزیع کاربری اراضی، تراکم جمعیت و مراکز تجاری - خدماتی مرتبط است و می‌تواند مبنای برنامه‌ریزی برای کاهش آلودگی صوتی از طریق اقدامات زیرساختی مانند ایجاد فضاهای سبز و موانع صوتی قرار گیرد.

مطالعهٔ حاضر نشان داد که در ساعات شبانه، بخش قابل توجهی از ایستگاه‌های اندازه‌گیری دارای تراز صوتی فراتر از ۷۰ دسی‌بل بوده‌اند؛ وضعیتی که می‌تواند ناشی از تداوم فعالیت منابع آلاینده صوتی، تردد وسایل نقلیه، و تشدید بازتاب صدا در ساعات شب باشد. هم‌چنین، در برخی ایستگاه‌ها، بالاترین سطح آلودگی صوتی در ساعات ظهر به ثبت رسیده است که احتمالاً به‌دلیل هم‌زمانی با اوج فعالیت‌های روزانه، افزایش ترافیک و تراکم انسانی در این بازهٔ زمانی است. تحلیل الگوی مکانی آلودگی صوتی نشان می‌دهد که مناطق مرکزی و شمالی بیشترین تأثیرپذیری را از این آلودگی دارند. در بیشتر ایستگاه‌ها، تراز آلودگی صوتی فراتر از حد مجاز گزارش شده است و این وضعیت می‌تواند سلامت عمومی شهروندان را در معرض تهدید جدی قرار دهد.

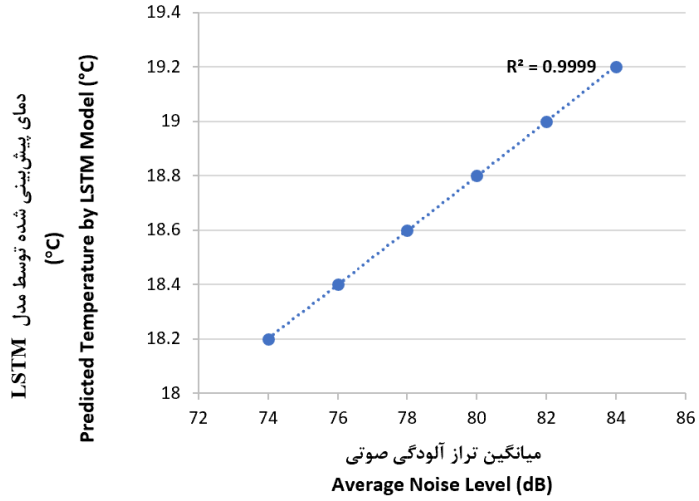
نتایج تحلیل فضایی پوشش گیاهی و ارتباط آن با آلودگی صوتی

به منظور بررسی ارتباط میان تغییرات اقلیمی و آلودگی صوتی، همبستگی بین دمای پیش‌بینی‌شده توسط مدل LSTM و میانگین تراز آلودگی صوتی محاسبه شد (شکل ۱۲). نتایج نشان داد که بین افزایش تدریجی دما و تغییرات تراز صوتی رابطه‌ای مثبت و قابل توجه برقرار است. این یافته بیانگر آن است که با افزایش دما، به‌ویژه در سال‌های آتی، احتمال افزایش حجم ترافیک و در نتیجه تشدید آلودگی صوتی در مناطق شهری نیز بیشتر می‌شود. از این رو، ترکیب نتایج پیش‌بینی دما با داده‌های میدانی آلودگی صوتی امکان تحلیل هم‌زمان دو بعد مهم از پایداری محیط‌زیست شهری را فراهم می‌کند و می‌تواند مبنای مناسبی برای سیاست‌گذاری‌های مدیریت اقلیم و آلودگی صوتی باشد.



شکل ۱۱– نقشه های توزیع مکانی میانگین تراز آلودگی صوتی منطقهٔ مطالعاتی به روش درون‌یابی IDW

Fig. 11. Spatial Distribution Maps of the Average Noise Pollution Level in the Study Area Using the IDW Interpolation Method



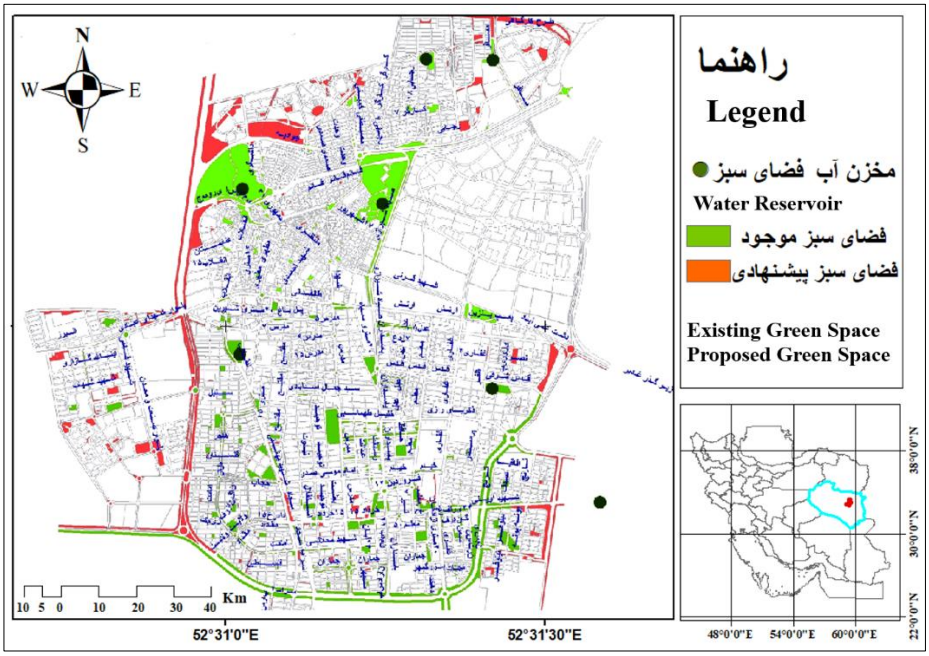
شکل ۱۲ – رابطه میان دمای پیش‌بینی‌شده و میانگین آلودگی صوتی

Fig. 12. Relationship between Predicted Temperature and Average Noise Pollution

مقایسهٔ نقشه پراکنش فضاهای سبز با نقشه‌های آلودگی صوتی نشان داد که مناطقی با تراکم بالاتر فضای سبز (به‌ویژه در جنوب و جنوب‌غربی شهر) هم‌زمان دارای شدت آلودگی صوتی کمتری هستند. این موضوع کارکرد دوگانهٔ فضای سبز را برجسته می‌سازد: از یک سو ارتقای کیفیت زیست‌محیطی و منظر شهری، و از سوی دیگر کاهش آلاینده‌های محیطی نظیر آلودگی صوتی. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که کمبود پارک‌ها در بخش‌های شمالی و مرکزی شهر، نه‌تنها به کاهش دسترسی شهروندان به فضاهای تفریحی منجر شده، بلکه در افزایش نسبی آلودگی صوتی این مناطق نیز نقش داشته است. این یافته‌ها زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند که در چارچوب تغییر اقلیم تحلیل شوند. در شرایطی که افزایش دما و کاهش منابع آبی می‌تواند تداوم و کیفیت پوشش گیاهی شهری را تهدید کند، توسعه هدفمند فضاهای سبز با گونه‌های مقاوم به خشکی و گرما، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. انتخاب چنین گونه‌هایی می‌تواند هم در ارتقای پایداری اکولوژیک فضاهای سبز مؤثر باشد و هم کارایی بیشتری در کاهش آلودگی صوتی داشته باشد.

نقشه‌های توزیع مکانی تراز آلودگی صوتی در سه بازهٔ زمانی (صبح، ظهر و شب) نشان داد که شدت آلودگی صوتی در محدوده‌های مختلف دارای تغییرات قابل توجهی است. بیشترین مقادیر آلودگی در ساعات ظهر (۷۴–۸۲ دسی‌بل) و در مناطق مرکزی و شمالی ثبت شده که عموماً فاقد پوشش گیاهی یا دارای پوشش بسیار ضعیف هستند. در مقابل، مناطق جنوبی و جنوب‌غربی با تراکم گیاهی بالا (شکل ۱۳) میانگین آلودگی صوتی کمتری را در هر سه بازهٔ زمانی تجربه کرده‌اند (به‌ویژه در شب با میانگین کمتر از ۵۹ دسی‌بل). این نتایج حاصل هم‌پوشانی نقشه‌های آلودگی صوتی و پوشش گیاهی در محیط GIS است و بیانگر یک رابطه معکوس میان تراکم پوشش گیاهی و شدت آلودگی صوتی است؛ به این معنا که افزایش تراکم پوشش گیاهی، منجر به کاهش محسوس در سطوح آلودگی صوتی می‌شود.

بررسی نقشه پراکنش پارک‌ها و فضاهای سبز در شهر بیرجند (شکل ۱۳) نشان داد که توزیع آن‌ها در سطح شهر یکنواخت نیست و تراکم بیشتری از پارک‌ها در مناطق مرکزی و جنوبی شهر مشاهده می‌شود. شهر بیرجند از نظر فضای سبز و پارک‌ها دارای توزیع نامتوازن است؛ بیشتر پارک‌ها در مناطق مرکزی و جنوبی متمرکز شده‌اند و مناطق دیگر کمتر دسترسی دارند. با وجود اینکه سرانه فضای سبز شهر از نظر کمی نسبت به استانداردهای ملی قابل قبول است (سرانه فضای سبز به ازای هر نفر: ۱۵/۹ متر مربع)، اما از نظر دسترسی مکانی و پراکندگی، هنوز کمبودهایی وجود دارد که بر توازن استفاده شهروندان از این فضاها تأثیر می‌گذارد. به عبارت دیگر، مسئلهٔ اصلی، کمبود فضای سبز نیست، بلکه عدم توزیع متوازن و دسترسی عادلانه به آن است.



شکل ۱۳- نقشه پراکنش فضاهای سبز در شهر بیرجند

Fig. 13. Distribution map of green spaces in Birjand city

تحلیل وضعیت آلودگی صوتی و پیشنهاد گونه‌های گیاهی برای کنترل آن در شهر بیرجند

بررسی نقشه‌های میانگین تراز آلودگی صوتی شهر بیرجند در سه بازه زمانی صبح، ظهر و شب نشان داد که مقادیر شدت صوت در بسیاری از مناطق از حدود مجاز تعیین‌شده برای کاربری‌های شهری فراتر رفته است (Sayadi & Movafagh, 2014). در ساعات ظهر، حداکثر شدت صوت ثبت‌شده (۸۱/۹۸ دسی‌بل) از آستانه مجاز مناطق صنعتی (۷۵ دسی‌بل) بیشتر می‌باشد. هم‌چنین در ساعات شب، مقادیر اندازه‌گیری‌شده در بخش‌های زیادی از شهر، بیش از حد مجاز شبانه برای مناطق صنعتی (۶۵ دسی‌بل) است. این یافته‌ها نشان داد که آلودگی صوتی در بیرجند، به ویژه در مناطق پرتراکم، نیازمند مداخلات هدفمند از جمله توسعه فضای سبز شهری است. مطالعهٔ الگوهای مکانی شدت صوت طی شبانه‌روز نشان داد که در ساعات صبح، خیابان‌هایی نظیر شهدا، امام رضا، سه‌راه امید و کوچهٔ انقلاب به دلیل شروع فعالیت‌های تجاری و اداری، شدت صوت بالایی در بازه ۶۵ تا ۷۵ دسی‌بل دارند.

در حال حاضر در فضای سبز شهری بیرجند، گونه‌هایی نظیر کاج تهران[۱]، اقاقیا[۲]، زیتون تلخ[۳]، داغداغان[۴]، انواع توت[۵]، بادام[۶] و عناب[۷] به‌طور گسترده کشت شده‌اند. این گونه‌ها نقش مهمی در ایجاد سایه و بهبود منظر شهری دارند. با این حال، به دلیل نیاز اکولوژیکی منطقه و شدت بالای صدا، توصیه می‌شود کاشت گونه‌های مقاوم و متراکم مانند کاج تهران به عنوان

1- Pinus eldarica
2- Robinia pseudoacacia
3- Melia azedarach
4- Celtis caucasica
5- Morus spp.
6- Prunus dulcis
7- Ziziphus jujuba

گونه اصلی و اقاقیا و سنجد تلخ [1] به عنوان گونه‌های مکمل در حاشیه خیابان‌ها ادامه یابد. این گونه‌ها به دلیل تراکم بالای برگ و گستردگی تاج، قابلیت جذب امواج صوتی بالایی دارند و طراحی کاشت باید به صورت نوارهای سه‌لایه‌ای با عرض ۳۰ تا ۵۰ متر انجام شود. در ساعات ظهر، با افزایش تردد و اوج فعالیت‌های شهری، شدت آلودگی صوتی در خیابان‌هایی مانند امام رضا، شهدا، ابوتراب و محدوده تقاطع‌های پرتردد به بالای ۷۴ دسی‌بل رسیده است. در این مناطق، به‌منظور کاهش آلودگی صوتی، علاوه بر گونه‌های ذکر شده، استفاده از درختچه‌های مقاومی مانند گز[2] در لایه‌های میانی و پایین‌تر پیشنهاد می‌شود. در ساعات شب، در خیابان‌هایی با شدت صوت بالا مانند عدالت و طالقانی، کاشت کمربندهای سبز متراکم با گونه‌هایی چون اقاقیا و سنجد تلخ ضروری است. هم‌چنین، استفاده از بوته‌های بومی مانند رز بیابانی[3] برای پر کردن فضاهای خالی توصیه می‌شود. در مناطق با شدت صوت پایین‌تر، کاشت پراکنده بوته‌های مقاوم به خشکی و چمن‌کاری‌های محلی بهبود کیفیت صوتی و منظر شهری را به همراه دارد (جدول ۴). هم‌چنین، گونه‌های مقاوم دیگری مانند کنار[4]، بادام کوهی[5]، زیتون[6] و پسته وحشی[7] می‌توانند برای کنترل بهتر آلودگی صوتی و ارتقای منظر شهری استفاده شوند. این گونه‌ها علاوه بر مقاومت بالا در برابر کم‌آبی و کاهش نیاز به آبیاری، موجب صرفه‌جویی در هزینه‌های نگهداری می‌شوند و عملکرد اکولوژیک مفیدی مانند بهبود کیفیت خاک و کاهش فرسایش ارائه می‌دهند. با این حال، برخی محدودیت‌ها نیز وجود دارد؛ از جمله کاهش تنوع زیستی در صورت تراکم پایین گونه‌ها و نیاز به مدیریت دقیق رشد گونه‌های سریع‌الرشد یا مهاجم. این ویژگی‌ها در تحلیل تأثیر پوشش گیاهی بر کاهش آلودگی صوتی شهری و ارزیابی کارایی گونه‌ها در شرایط تغییرات دمایی استفاده شده‌اند.

در پژوهش مالکی و حسینی (Maleki &Hosseini, 2011)، تأکید بر اهمیت ویژگی‌های مورفولوژیکی گیاهان در کاهش تراز صوتی شده است. براساس نتایج آن‌ها، عواملی مانند تراکم برگ، گسترش تاج و تعداد شاخه‌ها نقش کلیدی در جذب صوت ایفا می‌کنند. با توجه به اقلیم خشک و گرم بیرجند، استفاده از گونه‌های مقاوم به کم‌آبی و دماهای بالا که در عین حال توانایی جذب امواج صوتی را داشته باشند، ضروری است. در مناطق با شدت آلودگی بسیار بالا (بیش از ۷۵ دسی‌بل)، ترکیب کاشت گونه‌هایی نظیر کاج تهران، اقاقیا و گز به صورت سه‌ردیفه با تراکم بالا پیشنهاد می‌شود. این الگو می‌تواند با ایجاد لایه‌های متراکم، میزان آلودگی صوتی را تا حدود ۱۵ تا ۲۰ دسی‌بل کاهش دهد. در مناطق با شدت صوت متوسط (۶۵ تا ۷۵ دسی‌بل)، گونه‌های سریع‌الرشد و مقاومی مانند سنجد تلخ یا ملخ شیرین در قالب نوارهای سبز باریک‌تر (با عرض ۱۵ تا ۳۰ متر) کارایی مناسبی خواهند داشت. با توجه به شرایط اقلیمی شهر بیرجند، ملخ شیرین می‌تواند در این منطقه رشد کند. البته قبل از کاشت این درخت، لازم است که تأثیرات زیست‌محیطی و مدیریتی آن به‌دقت ارزیابی شود تا از تبدیل آن به گونه‌ای مهاجم در اکوسیستم‌های بومی جلوگیری شود. در بخش‌هایی که شدت صوت در حد مجاز باقی مانده است (کمتر از ۶۵ دسی‌بل)، تمرکز بر تثبیت وضعیت موجود با استفاده از چمن‌های مقاوم به خشکی[8] و بوته‌های بومی[9] بهترین رویکرد خواهد بود.

1- Elaeagnus angustifolia
2- Tamarix spp
3- Rosa persica
4- Prosopis cineraria
5- Amygdalus scoparia
6- Olea europaea var. sylvestris
7- Pistacia vera var. khinjuk
8- Drought-Resistant Turfgrasses
9- Native Shrubs

جدول ۴- پیشنهاد گونه‌های گیاهی مناسب برای خیابان‌های منتخب بیرجند بر اساس شدت آلودگی صوتی

Table 4- Suggested Plant Species for Selected Streets of Birjand Based on Noise Pollution Intensity

خیابان/منطقه Street/Region	بازه زمانی پرصدا Noisy Time Period	شدت صوت (دسی‌بل) Noise Intensity (dB)	وضعیت نسبت به حد مجاز Status Compared to Permissible Limit	گونه‌های پیشنهادی Suggested Plant Species
خیابان شهدا، امام رضا، سه‌راه امید، کوچه انقلاب Shohada Street, Emam Reza Street, Omid Three-Way Intersection, Enghelab Alley	صبح Morning	65–75 dB	بالاتر از حد کاربری مسکونی و تجاری Above Permissible Levels for Residential and Commercial Use	کاج تهران (Pinus eldarica)، اقاقیا (Robinia pseudoacacia)، سنجد تلخ (Elaeagnus angustifolia) – چیدمان سه‌لایه با عرض ۵۰–۳۰ متر Three-Layer Arrangement with a Width of 30–50 Meters
خیابان امام رضا، شهدا، ابوتراب، تقاطع‌ها Emam Reza Street, Shohada Street, AbouTorab Street, Intersections	ظهر Noon	Above 74 dB	فراتر از حد مجاز کاربری صنعتی Exceeds Industrial Use Limits	ترکیب کاج تهران (Pinus eldarica)، اقاقیا (Robinia pseudoacacia)، گز (Tamarix aphylla) با تراکم بالا – فاصله کاشت ۳< متر Combination of Pine, Acacia, Tamarisk with High Density-Planting Distance > 3 Meters
خیابان‌های عدالت، طالقانی، انقلاب Edalat Street, Taleghani Street, Enghelab Street	شب Night	Above 72-76 dB	بالاتر از حد مجاز شبانه برای کاربری صنعتی Above Permissible Night-Time Levels for Industrial Use	اقاقیا (Robinia pseudoacacia) و سنجد تلخ (Elaeagnus angustifolia)، رز بیابانی (Rosa persica) – مناسب مناطق با شبنم شبانه Suitable for Areas with Nighttime Dew
خیابان معلم (جنوب شهر بیرجند) Moalem Street (South of the Birjand City)	تمام روز All day	58-65	در محدوده مجاز کاربری مسکونی Within Permissible Range for Residential Use	چمن‌های مقاوم به خشکی (drought-resistant turfgrasses)، بوته‌های بومی پراکنده (native shrubs)
مناطق با شدت صوت بالا (عمومی) High Noise Intensity Areas (Public)	همه بازه‌ها All Time Periods	Above 75 dB	بسیار پرصدا Very Noisy	الگوی ترکیبی کاج تهران (Pinus eldarica)، اقاقیا (Robinia pseudoacacia)، گز (Tamarix aphylla) – کاهش تا ۲۰ دسی‌بل Mixed PatternReduces up to 20 dB
مناطق با شدت صوت متوسط Moderate Noise Intensity Areas	همه بازه‌ها All Time Periods	65-75	نیاز به مداخله متوسط Requires Moderate Intervention	سنجد تلخ (Elaeagnus angustifolia)، ملخ شیرین (Gleditsia triacanthos) – نوارهای سبز با عرض ۳۰–۱۵ متر Green Belts 15–30 Meters Wide
مناطق با شدت صوت پایین Low Noise Intensity Areas	همه بازه‌ها All Time Periods	Below 65 dB	نیاز به تثبیت شرایط موجود Requires Maintaining Current Conditions	چمن‌های مقاوم (Resilient Grasses)، بوته‌های بومی (Native Xerophytic Shrubs) خشک‌زی – تمرکز بر منظر و نگهداری کم هزینه ,– Focus on Low-Maintenance Landscaping

کاهش آلودگی صوتی در مناطق شهری امری چندبعدی است و نیاز به راهکارهای ترکیبی دارد. استفاده از گیاهان به‌عنوان یک راهکار طبیعی، نه‌تنها در کاهش مؤثر صدا کارایی دارد، بلکه از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی نیز پایدارتر از سایر روش‌های فنی و مکانیکی می‌باشد. بافت گیاهان، تراکم برگ‌ها و نحوهٔ کاشت آن‌ها از جمله عوامل تعیین‌کننده در میزان تأثیرگذاری بر کاهش آلودگی صوتی هستند. تحقیقات نشان داده‌اند که حتی کمربندهای باریک از درختان نیز می‌توانند به‌طور مؤثری شدت صدا را کاهش دهند. در شهرهایی مانند بیرجند که دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک هستند، انتخاب گونه‌های مقاوم و مناسب اقلیمی برای طراحی فضای سبز، اهمیت بیشتری دارد. هم‌چنین با توجه به محدودیت منابع آبی، استفاده از گیاهان بومی و مقاوم به خشکی توصیه می‌شود. با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک بیرجند و ویژگی‌های خاص آن از جمله کم‌بارشی (حدود ۱۷۰ میلی‌متر در سال)، دمای بالا، تبخیر زیاد و وزش باد شدید که می‌تواند به انتقال صوت منجر شود، انتخاب گیاهانی که هم از نظر کاهش آلودگی صوتی مؤثر باشند و هم با شرایط محیطی منطقه سازگار باشند، ضروری است. در این راستا، گیاهانی با ویژگی‌هایی مانند تراکم برگ زیاد، شاخه‌های گسترده، ساختار چندلایه و مقاوم به کم‌آبی باید مدنظر قرار گیرند. درختان سوزنی‌برگ مانند سرو شیرازی[1] و کاج تهران به دلیل رشد سریع، تراکم بالا و مقاومت در برابر خشکی و باد می‌توانند به‌عنوان انتخاب‌های اصلی برای کاهش آلودگی صوتی در این شهر باشند. هم‌چنین، درختان پهن‌برگ مقاوم مانند اقاقیا و نارون چتری[2] به‌خوبی می‌توانند به جذب و کاهش صدا در مناطق مسکونی و تجاری کمک کنند. استفاده از درختچه‌های همیشه سبز مانند مورد[3] و شمشاد نقره‌ای[4] می‌تواند به عنوان پوشش جانبی در کاهش نویز و محافظت از فضای پایین در برابر انعکاس صدا مؤثر باشد (جدول ۵). علاوه بر این، طراحی ترکیبی از درختان سوزنی‌برگ، درختان پهن‌برگ و درختچه‌های مقاوم به خشکی در لایه‌های مختلف گیاهی (از لایه‌های بالایی تا پایین‌تری که به زمین نزدیک‌ترند) می‌تواند به افزایش کارایی جذب صدا و هم‌چنین ایجاد محیطی پایدار و سازگار با اقلیم خشک شهر بیرجند کمک کند (Nias, 2021).

یافته‌های این پژوهش نشان داد که پوشش گیاهی علاوه بر ارزش‌های زیست‌محیطی شناخته‌شده، نقشی کلیدی در تعدیل آلودگی صوتی ایفا می‌کند. پوشش متراکم گیاهی با ایجاد موانع فیزیکی و جذب امواج صوتی، مانع از گسترش آلودگی صوتی در محیط شهری می‌شود. این موضوع از منظر مدیریت شهری پایدار اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا توسعهٔ فضای سبز می‌تواند به‌طور هم‌زمان کیفیت زندگی ساکنان را ارتقا داده و فشار ناشی از آلاینده‌های صوتی بر سلامت عمومی را کاهش دهد. مقایسهٔ نقشه پراکنش پوشش گیاهی (نقشه شاخصNDVI) و طبقات شدت پوشش گیاهی با نقشه‌های آلودگی صوتی نشان داد که مناطقی با تراکم بالاتر فضای سبز ـ به‌ویژه در جنوب و جنوب‌غربی شهر ـ دارای شدت آلودگی صوتی کمتری هستند. این یافته کارکرد دوگانهٔ فضای سبز را برجسته می‌سازد: از یک سو ارتقای کیفیت زیست‌محیطی و منظر شهری، و از سوی دیگر کاهش آلاینده‌های محیطی نظیر آلودگی صوتی. در مقابل، کمبود پارک‌ها و فضای سبز در بخش‌های شمالی و مرکزی شهر نه‌تنها دسترسی شهروندان به فضاهای تفریحی را کاهش داده، بلکه با افزایش نسبی آلودگی صوتی در این مناطق نیز همراه بوده است.

1- Cupressus sempervirens
2- Ulmus pumila
3- Myrtus communis
4- Euonymus japonicus

جدول ۵- ویژگی‌های گیاهان مناسب برای کاهش آلودگی صوتی بر اساس نقش کاهش نویز و سازگاری با اقلیم

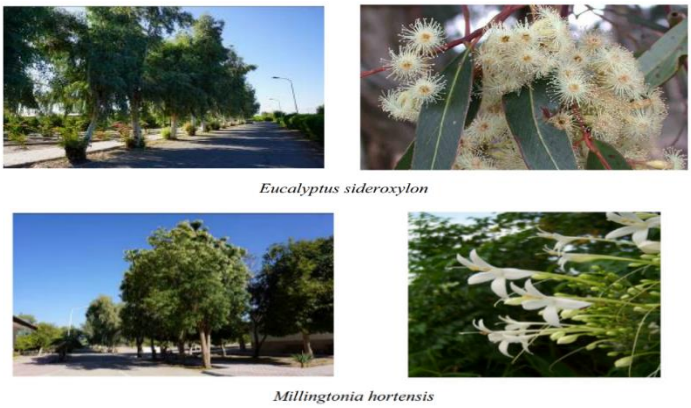
Table 5- Characteristics of Plant Species Suitable for Noise Pollution Reduction Based on Noise Attenuation Role and Climate Adaptability

گونه گیاهی Plant Species	نوع Type	نقش اصلی در کاهش صدا Main Role in Noise Reduction	مقاومت به خشکی Drought Resistance	محل کاشت مناسب Suitable Planting Location
سرو شیرازی (Cupressus sempervirens var. pyramidalis)	درخت سوزنی Coniferous Tree	جذب و شکستن صداهای بلند Absorbs and Breaks Loud Noises	خیلی زیاد Very High	حاشیه خیابان‌های شلوغ Busy Street Edges
کاج تهران (Pinus eldarica)	درخت سوزنی Coniferous Tree	دیوار صوتی دائم Permanent Sound Barrier	زیاد High	کنار اتوبان Along Highways
اقاقیا (Robinia pseudoacacia)	درخت پهن‌برگ Broadleaf Tree	جذب صداهای متوسط Absorbs Medium-Level Sounds	زیاد High	پارک‌ها و فضاهای باز Parks and Open Spaces
نارون چتری ('Pendula Ulmus glabra')	درخت پهن‌برگ Broadleaf Tree	سایه و کنترل بازتاب صدا Provides Shade and Controls Sound Reflection	زیاد High	کنار معابر فرعی Along Secondary Roads
مورد (Myrtus communis)	درختچه Shrub	پر کردن فضای زیرین Fills Understory Space	زیاد High	فضای بین درختان Between Trees
شمشاد نقره‌ای (Buxus sempervirens 'Argentea')	درختچه Shrub	جذب نویز سطحی Absorbs Surface Noise	متوسط به زیاد Medium to High	حاشیه پیاده‌رو Sidewalk Edges
زرشک زینتی (Berberis thunbergii ''Atropurpurea')	درختچه Shrub	تزئینی، خنثی‌سازی صوت Ornamental, Neutralizes Sound	زیاد High	اطراف میدان‌ها Around Squares

ارتباط این موضوع با تغییر اقلیم نیز قابل توجه است. تغییرات دما و کاهش منابع آبی می‌تواند سبب افت کیفیت و تراکم پوشش گیاهی شود و در نتیجه توانایی اکوسیستم‌های شهری در کنترل آلودگی صوتی نیز کاهش یابد. در چنین شرایطی، حفظ و توسعه پوشش گیاهی شهری نه‌تنها یک راهکار برای مقابله با آلودگی صوتی است، بلکه به‌عنوان استراتژی سازگاری با تغییر اقلیم نیز اهمیت دارد. ایجاد کمربندهای سبز، توسعه فضاهای سبز شهری و افزایش تراکم گیاهی به‌ویژه در نواحی پر سروصدا، می‌تواند اثرات منفی تغییر اقلیم (از جمله افزایش دما و تشدید جزیره حرارتی شهری) را کاهش داده و تاب‌آوری زیست‌محیطی شهر را ارتقا دهد. همچنین، انتخاب گونه‌های مقاوم به خشکی و گرما در طراحی فضاهای سبز، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. استفاده از این گونه‌ها ضمن تضمین پایداری اکولوژیک فضاهای سبز در شرایط اقلیمی جدید، می‌تواند کارایی بیشتری در کاهش آلودگی صوتی نیز داشته باشد.

انتخاب گونه‌های گیاهی برای فضاهای سبز در مناطق خشک به دلیل محدودیت‌های محیطی بسیار پیچیده است. این فضاها باید بیشترین خدمات را برای ساکنان شهری فراهم کنند.

پژوهش شرافتمند و خسروی (Sharafatmandrad & Khosravi Mashizi, 2025) رویکردی برای انتخاب گونه‌های گیاهی در فضای سبز شهری ارائه کرده است که در آن مجموعه‌ای از خدمات اکوسیستمی (مانند تأمین زیستگاه، ارزش زیبایی‌شناختی و تفریحی) و همچنین آسیب‌های بالقوه (نظیر آسیب به زیرساخت‌ها) به‌طور هم‌زمان وزن‌دهی و ارزیابی شدند. نتایج نشان داد خدمات حدود ۱/۴ برابر بیشتر از آسیب‌ها بر انتخاب گونه‌ها اثر دارند و ویژگی‌های گیاهی می‌توانند این اثرات را تقویت کنند. ارتفاع درخت بیشترین تأثیر مثبت را بر خدمات داشت، در حالی که پوشش تاج و طول عمر برگ به‌طور مشابه بر خدمات و آسیب‌ها اثر گذاشتند. در نهایت، Millingtonia hortensis به‌عنوان مناسب‌ترین و Eucalyptus sideroxylonبه‌عنوان نامناسب‌ترین گونه شناسایی شد (شکل ۱۴). این رویکرد می‌تواند ابزاری کاربردی برای مدیران شهری در مناطق خشک باشد.



شکل ۱۴- گونه‌های گیاهی مورد استفاده در فضاهای سبز مناطق شهری با اقلیم خشک

Fig. 14. Plant Species Used in Green Spaces of Urban Areas with Arid Climate (Sharafatmandrad & Khosravi Mashizi, 2025)

مقایسهٔ میانگین شدت نویز بین مناطق مختلف با استفاده از ANOVA یک‌طرفه از طریق افزونهٔ Analysis ToolPak در Excel انجام شد. نتایج ANOVA یک‌طرفه نشان داد که تفاوت میانگین شدت نویز بین مناطق مختلف به‌صورت آماری معنادار است ($p < 0.001$). این یافته‌ها نشان می‌دهد که شدت نویز در هر منطقه متفاوت است و بنابراین انتخاب گونه‌های گیاهی متناسب با هر سطح شدت صوتی اهمیت بالایی دارد. با توجه به واریانس نسبتاً کم درون گروه‌ها، دقت نتایج نسبتاً بالا است و تفاوت‌های مشاهده‌شده قابل اعتماد می‌باشد. این تحلیل آماری مکمل پیشنهاد گونه‌های گیاهی ارائه‌شده است و مبنای علمی مناسبی برای طراحی و مدیریت فضای سبز شهری در کاهش آلودگی صوتی فراهم می‌کند. این پژوهش نقش مؤثری در طراحی و برنامه‌ریزی شهری، به‌ویژه در توسعه فضاهای سبز شهر بیرجند ایفا می‌کند و اهمیت فضای سبز شهری در بهبود کیفیت محیط و کاهش اثرات منفی شهری را مورد تأکید قرار می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که پوشش گیاهی متراکم، به‌ویژه درختان با برگ‌های پهن و شاخه‌های منشعب، می‌توانند در کاهش آلودگی صوتی مناطق مسکونی مؤثر باشند. ایجاد نوارهای سبز چندلایه با ارتفاع‌های متفاوت، همراه با مدیریت ترافیک و زمان‌بندی عبور و مرور، به کاهش نویز شهری کمک شایانی می‌کند و گیاهان با جذب، انعکاس و انسداد صوت، علاوه بر ایجاد آرامش روانی، درک افراد از شدت صدا را کاهش می‌دهند.

نتایج مطالعه صیادی و موفق (Sayadi & Movafagh, 2014)، نشان داد که آلودگی صوتی در مناطق مسکونی از آستانه مجاز فراتر رفته و رابطهٔ مستقیمی با حجم ترافیک دارد. هم‌چنین، پیشنهاد می‌شود که برای کاهش آلودگی صوتی، در طراحی شهری تجدید نظر شده و اقدامات کنترلی مانند محدودسازی تردد در خیابان‌های کم‌عرض و توسعه مسیرهای جایگزین انجام شود. همچنین در پژوهش‌های اخیر در شهرهای اردبیل، سلماس و کرج، استفاده از شاخص‌های سنجش از دور و مدل‌های تحلیلی برای ارزیابی وضعیت و کیفیت فضای سبز شهری مورد توجه قرار گرفته است. در اردبیل، با استفاده از شاخص‌های گراف‌پایه، اتصال‌پذیری و تغییرات فضایی فضای سبز در مناطق مختلف شهری بررسی شده است (Mostafazadeh, Alaei, Mirchooli & Hussain, 2024). در سلماس، تحلیل تغییرات زمانی و مکانی فضای سبز شهری با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های اکولوژی منظر انجام شده و روند کاهش سرانه فضای سبز در این شهر مشخص شده است (Alaei, Mohammadzadeh, Mostafazadeh & Talebi Khiavi, 2024). همچنین در کرج، ارزیابی کیفیت محیط زیستی با استفاده از شاخص RSEI و تحلیل الگوهای فضایی منظر برای بررسی وضعیت فضای سبز شهری صورت گرفته است (Naseri & Mostafazadeh, 2023). این مطالعات بر اهمیت توزیع فضایی، کیفیت و طراحی استراتژیک فضای سبز شهری در بهبود کیفیت محیط و برنامه‌ریزی پایدار شهری تأکید دارند. در حالی که مطالعات پیشین عمدتاً به تحلیل تراکم و اتصال‌پذیری فضای سبز در شهرهای با اقلیم معتدل یا مرطوب متمرکز بوده‌اند، پژوهش حاضر به بررسی شهر بیرجند با اقلیم خشک و نیمه‌بیابانی اختصاص یافته است؛ شرایطی که انتخاب گونه‌های مقاوم به خشکی و استراتژی‌های کاشت بهینه را ضروری می‌سازد. علاوه بر این، استفاده از مدل یادگیری عمیق LSTM، امکان پیش‌بینی تغییرات دمای سالانه تا سال ۲۰۳۵ و ارزیابی اثرات آن بر شدت آلودگی صوتی و کارایی پوشش گیاهی را فراهم کرده است. از این رو، وجه تمایز اصلی این مطالعه در ترکیب تحلیل فضایی، پیش‌بینی اقلیمی و ارزیابی تأثیر پوشش گیاهی بر آلودگی صوتی در شرایط اقلیمی خشک است، که علاوه بر تأیید یافته‌های منابع مرجع، راهکارهای کاربردی و آینده‌نگر برای طراحی شهری پایدار ارائه می‌دهد و به بهبود کیفیت زندگی در مناطق پرتردد شهری کمک می‌کند.

نتیجه‌گیری

شبکه‌های عصبی مصنوعی مانند LSTM با قابلیت پیش‌بینی سناریوهای اقلیمی آینده و شبیه‌سازی روابط غیرخطی، ابزارهای قدرتمندی برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی به شمار می‌روند (Shobanke, Bhatt & Shittu, 2025). این فناوری‌ها نه تنها دقت مدل‌سازی اقلیم را ارتقا داده‌اند، بلکه به سیاست‌گذاران کمک می‌کنند تا استراتژی‌های مؤثرتری برای سازگاری با تغییرات اقلیمی طراحی کنند. مدل‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه LSTM، در تقویت تاب‌آوری سیستم‌های زیرساختی و پیش‌بینی دقیق تغییرات دما و رطوبت نقشی کلیدی دارند. این مدل‌ها قادرند روندهای آتی تغییرات اقلیمی را با دقت پیش‌بینی کرده و امکان شناسایی نقاط بحرانی و طراحی شهری سازگارتر با اقلیم را فراهم آورند. پژوهش حاضر نشان داد که استفاده از مدل LSTM، ابزاری قدرتمند برای پیش‌بینی دقیق تغییرات دما به منظور تحلیل اثرات پوشش گیاهی بر کاهش آلودگی صوتی در مناطق شهری است. نتایج عددی به‌دست‌آمده بیانگر آن بود که توسعه پوشش گیاهی در مناطق با شدت آلودگی صوتی (مانند خیابان‌های پرتردد و نواحی صنعتی) می‌تواند به کاهش قابل توجه سطح آلودگی صوتی در حدود ۱۰ تا ۱۵ دسی‌بل منجر شود. همچنین نتایج نشان داد که افزایش پوشش گیاهی در محیط‌های شهری قادر است میانگین دمای سطحی را تا حدود ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد. این یافته‌ها بر نقش حیاتی پوشش گیاهی در ارتقای کیفیت اقلیم شهری و کاهش اثرات نامطلوب تغییرات آب‌وهوایی تأکید دارد. از نقاط قوت این تحقیق می‌توان به به‌کارگیری مدل‌های

یادگیری عمیق برای شبیه‌سازی روابط غیرخطی اقلیمی، ترکیب تحلیل‌های صوتی و اقلیمی، و تمرکز بر شرایط اقلیمی مناطق خشک اشاره کرد که رویکردی نوین در طراحی شهری پایدار ارائه می‌دهد. با این حال، مطالعهٔ حاضر محدودیت‌هایی نیز دارد؛ از جمله؛ وابستگی مدل به داده‌های محلی و کوتاه‌مدت، عدم لحاظ تمامی متغیرهای محیطی مانند رطوبت خاک و باد، و چالش در تعمیم‌پذیری نتایج به سایر مناطق با اقلیم متفاوت. با وجود این محدودیت‌ها، نتایج پژوهش اهمیت بالای استفاده از فضای سبز شهری، به‌ویژه درختان بلند، گونه‌های مقاوم به خشکی و دیوارهای سبز را در کاهش آلودگی صوتی و بهبود کیفیت اقلیم شهری تأیید می‌کند. برای بهره‌برداری عملی از این نتایج، پیشنهاد می‌شود:

۱. در سیاست‌گذاری‌های شهری، توسعه گونه‌های مقاوم به خشکی در اولویت قرار گیرد تا هزینه‌های نگهداری کاهش یافته و کارایی اکولوژیک فضای سبز افزایش یابد.
۲. طراحی فضاهای سبز با بهره‌گیری از مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی صورت گیرد تا انتخاب گونه‌ها متناسب با تغییرات دمای آینده انجام شود.
۳. مطالعات آینده با استفاده از داده‌های سنجش از دور و مدل‌های کمی یکپارچه توسعه یابند تا دقت تحلیل‌های صوتی و اقلیمی افزایش یابد.

به‌طورکلی، این پژوهش تأکید می‌کند که طراحی فضای سبز شهری نباید صرفاً به جنبه زیبایی‌شناسی محدود شود، بلکه باید به عنوان ابزاری چندمنظوره برای کاهش گرمایش موضعی، تعدیل آلودگی صوتی شهری و ارتقای سلامت روانی ساکنان در نظر گرفته شود. این رویکرد نوین می‌تواند گامی مؤثر در جهت ارتقای تاب‌آوری شهرها در برابر تغییرات اقلیمی، به‌ویژه در مناطق خشک باشد.

References

Alaei, N., Mohammadzadeh, F., Mostafazadeh, R., & Talebi Khiavi, H. (2024). Assessing spatiotemporal urban green space per capita and its connectivity in a small size city in Northwest Iran. *GeoJournal*, *89*(4), 148. https://doi.org/10.1007/s10708-024-11159-7

Arsalan, M., Chamani, A., & Zamani-Ahmadmahmoodi, R. (2024). Sustaining tranquility in small urban green parks: A modeling approach to identify noise pollution contributors. *Sustainable Cities and Society*, *113*, 105655. https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105655

Chen, S., He, P., Yu, B., Wei, D., & Chen, Y. (2024). The challenge of noise pollution in high-density urban areas: Relationship between 2D/3D urban morphology and noise perception. *Building and Environment*, *253*, 111313. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111313

Fallah-Shorshani, M., Yin, X., McConnell, R., Fruin, S., & Franklin, M. (2022). Estimating traffic noise over a large urban area: An evaluation of methods. *Environment International*, *170*, 107583. https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107583

Ganjirad, M., Delavar, M. R., Bagheri, H., & Azizi, M. M. (2025). Optimizing urban critical green space development using machine learning. *Sustainable Cities and Society*, *120*, 106158. https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106158

GR, A. N., & Adarsh, S. (2025). Innovative knowledge-based system for streamflow hindcasting: A comparative assessment of Gaussian Process-Integrated Neural Network with LSTM and GRU models. *Environmental Modelling & Software*, *188*, 106433. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106433

Guo, Z., & Feng, L. (2024). Multi-step prediction of greenhouse temperature and humidity based on temporal position attention LSTM. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *38*(12), 4907-4934. https://doi.org/10.1007/s00477-024-02840-x

Gupta, B. B., Gaurav, A., Attar, R. W., Arya, V., Bansal, S., Alhomoud, A., & Chui, K. T. (2024). Advance drought prediction through rainfall forecasting with hybrid deep learning model. *Scientific Reports*, *14*(1), 30459. https://doi.org/10.1038/s41598-024-80099-6

Helbich, M., Hagenauer, J., Burov, A., & Dzhambov, A. M. (2025). Traffic noise assessment in urban Bulgaria using explainable machine learning. *Sustainable Cities and Society*, *120*, 106169. https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106169

Iran Meteorological Organization (IRIMO). (2020). *Climatological Yearbook of Synoptic Stations of Iran (1988–2018).* Tehran: Research and Technology Deputy, IRIMO.

Li, J., & Heap, A. D. (2008). *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*. Geoscience Australia, 137.

Madhavi, M., Kolikipogu, R., Prabakar, S., Banerjee, S., Maguluri, L. P., Raj, G. B., & Balaram, A. (2024). Experimental evaluation of remote sensing–based climate change prediction using enhanced deep learning strategy. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, *7*(4), 642-656. https://doi.org/10.1007/s41976-024-00152-w

Mahmoudzadeh, H., Abedini, A., Aram, F., & Mosavi, A. (2024). Evaluating urban environmental quality using multi criteria decision making. *Heliyon*, *10*(3), e24921. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24921

Maleki, K., & Hosseini, S. M. (2011). Investigation of the effect of leaves, branches and canopies of trees on noise pollution reduction. *Annals of Environmental Science*, *5*(1), 3. https://openjournals.library.northeastern.edu/aes/journal/article/view/v5art3

Mostafazadeh, R., Alaei, N., Mirchooli, F., & Hussain, S. (2024). Changes in urban green space configuration and connectivity using spatial graph-based metrics in Ardabil developing city, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, *196*(9), 778. https://doi.org/10.1007/s10661-024-12922-6

Munandar, T. A., & Surbakti, H. (2025). Hybrid deep learning for climate prediction with Temporal, Spatial, and environmental data. *International Journal of Information Technology*, 1-14. https://doi.org/10.1007/s41870-025-02509-w

Naseri, N., & Mostafazadeh, R. (2023). Spatial relationship of Remote Sensing Ecological Indicator (RSEI) and landscape metrics under urban development intensification. *Earth Science Informatics*, *16*(4), 3797-3810. https://doi.org/10.1007/s12145-023-01119-z

Nias, M. (2021). *Assessment and modeling of the relationship between land use and noise pollution in Shiraz city*. (Master's thesis). Environmental Science and Engineering (Land use Planning), Isfahan University of Technology, Faculty of Natural Resources. [In Persian]

Razavi-Termeh, S. V., Sadeghi-Niaraki, A., Yao, X. A., Naqvi, R. A., & Choi, S. (2024). Assessment of noise pollution-prone areas using an explainable geospatial artificial intelligence approach. *Journal of Environmental Management*, *370*, 122361. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122361

Reyes-Avila, A. D., & Baxter, R. A. (2024). Assessment of urbanization impacts in Tegucigalpa urban greenness via normalized difference vegetation index. *Trees, Forests and People*, *18*, 100680. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100680

Sayadi, M. H., & Movafagh, A. (2014). Assessment of noise pollution in Birjand using statistical techniques and GIS. *Environmental Studies Quarterly*, *40*(3), 693–710. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jes.2014.52214

Sharafatmandrad, M., & Khosravi Mashizi, A. (2025). Plant species selection for urban green spaces in arid lands: a new approach using ecosystem services and disservices. *Landscape and Ecological Engineering*, *21*(1), 47-64. https://doi.org/10.1007/s11355-024-00624-7

Shobanke, M., Bhatt, M., & Shittu, E. (2025). Advancements and future outlook of Artificial Intelligence in energy and climate change modeling. *Advances in Applied Energy*, *17*, 100211. https://doi.org/10.1016/j.adapen.2025.100211

Statistical Center of Iran. (2020). *Statistical Yearbook of South Khorasan Province*. Birjand: Management and Planning Organization of South Khorasan.

Vo, T. Q., Kim, S. H., Nguyen, D. H., & Bae, D. H. (2023). LSTM-CM: a hybrid approach for natural drought prediction based on deep learning and climate models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *37*(6), 2035-2051. https://doi.org/10.1007/s00477-022-02378-w

Yang, Z., Kwan, M., Liu, D., & Huang, J. (2025). How objective and subjective greenspace, combined with air and noise pollution, impacts mental health through the mediation of physical activity. *Urban Forestry & Urban Greening*, *105*, 128683. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.128683

Vol. 14, No.4, Winter 2025, p. 230-250 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.93316.1569 OPEN ACCESS

Analysis of the Spatial Pattern of Physical Resilience of Rural Settlements in Rudbar County Against Earthquakes

Maryam Zarghampour[1], Timur Amar [2*], Parviz Rezaie[3]

[1,2 & 3] Department of Geography, Ra. C., Islamic Azad University, Rasht, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 03 May 2025

Revised: 08 August 2025

Accepted: 13 August 2025

Available Online: 08 September 2025

Keywords:

Physical Resilience

Rural Settlements

Earthquake Risk

Local Moran's I

Spatial Analysis

Getis-Ord G* Hot Spot Analysis

ABSTRACT

Resilience is a key concept in both psychology and physics that was introduced into geography in the late twentieth century and has since been examined from various human and natural perspectives. This study aims to analyze the spatial pattern of the physical resilience of rural settlements in Rudbar County against earthquakes. To this end, 12 criteria and 36 sub-criteria were employed, and the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Weighted Sum (WS) methods were applied to quantify settlement resilience. Furthermore, Local Moran's I and (Getis-Ord G*) hot spot analysis were utilized to examine the spatial patterns of resilience. The results indicated that, using the AHP method, the resilience levels of rural settlements were 0.66% very low, 13.24% low, 59.61% moderate, 26.49% high, and 0% very high, whereas the WS method yielded 3.32% very low, 33.77% low, 55.64% moderate, 7.27% high, and 0% very high. High-High (HH) clustering patterns were observed in the plains and piedmont areas, while Low-Low (LL) clusters were located in mountainous regions. The HH clusters corresponded to villages with high resilience, whereas LL clusters coincided with villages exhibiting low resilience. Moreover, resilience hot spots were concentrated in the northern piedmont region of Rudbar County, while cold spots were located in the mountainous Khorgam area. Overall, results obtained from both AHP and WS methods were consistent with those from Local Moran's I and (Getis-Ord G*) analyses, confirming significant spatial heterogeneity in the physical resilience of rural settlements against earthquakes. These findings highlight the importance of spatially informed resilience assessment for disaster risk reduction and rural planning.

* Corresponding author: Timur Amar E-mail address: amar@iau.ac.ir

How to cite this article: Zarghampour, M., Amar, T., & Rezaie, P. (2025). Analysis of the Spatial Pattern of Physical Resilience of Rural Settlements in Rudbar County Against Earthquakes. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 14*(4), 230-250. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.93316.1569

©2025 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 concept of resilience to natural hazards is used in the field of disaster management. Numerous models and indicators have been developed and applied to examine resilience to natural hazards. However, most models and indicators do not take into account spatial differences and patterns. Therefore, the results of most studies cannot represent a spatial perspective (Sung & Liaw, 2021). The aim of this research is to investigate the spatial pattern and differences in the resilience of rural settlements to earthquake risk. Therefore, spatial autocorrelation analysis, which is one of the most ideal statistical approaches, has been used to detect spatial distribution patterns. This research seeks to identify the spatial pattern of the level of physical resilience of rural areas of Rudbar County against earthquakes, and aims to answer the question "To what extent is the physical resilience of rural settlements in Rudbar County against earthquakes?"

Material and Methods

This study was conducted in Gilan province and Rudbar city at geographical coordinates 36° 32′ to 37° 07′N latitude and 49° 11′ to 50° 05′E longitude. According to the 2016 census, this county has a population of 100,943 people, 30,350 households, and accounts for 4% of the total population of Gilan province. There are also 151 inhabited villages in this county, according to the general population and housing census.

In this study, 12 criteria and 36 sub-criteria effective in the physical resilience of rural settlements were identified with the help of experts and specialists in this field. Then, the effect of each criterion on the final level of resilience was determined in order of importance, and the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Weighted Sum (WS) models were used to determine the level of resilience of rural settlements, as well as two local Moran I indices and hot spot analysis in ArcGIS software to identify the type of spatial pattern.

Results and Discussion

The results of spatial cluster and non-cluster analysis of the analytic hierarchy process (AHP) index values using the local Moran I method showed that the high-high (HH) cluster is located in the northeast of the study area. In other words, villages with high resilience are visible in the plain and foothill areas of northern Rudbar County along the Sefidrood Valley to Rostam Abad and have a high-high (HH) cluster pattern. In this regard, most rural settlements in the Khorgam district of Rudbar county also have a low-low (LL) cluster pattern and are less resilient to earthquakes. Also, most of the villages located in the foothills of this county have moderate resilience to earthquakes and do not show significant differences with the high-high or low clusters, and have random and meaningless behavior. As a result, out of 151 villages in this county, 69 villages have random behavior (45.7%), 29 villages have a high-high pattern (19.2%), zero villages have a high-low pattern (0%), 18 villages have a low-high pattern (11.9%) and 35 villages have a low-low pattern (23.2%).

The spatial pattern of the resilience of rural settlements using the weighted sum (WS) method with the local Moran's I statistic showed that the high-high (HH) pattern includes villages in the plain and foothills, and the low-low (LL) pattern includes villages in the mountainous region. The HH pattern includes villages located in the northern part of Rudbar County, which extends along the Sefidrood Valley to the beginning of Rudbar. Also, most of the villages located in the mountainous area of Khorgam district of Rudbar county also have the LL pattern and their resilience to earthquakes is low. As a result, out of 151 villages in this county, 63 villages follow random behavior (41.7%), 46 villages follow the high-high pattern (30.5%) and 30 villages follow the low-low pattern (19.9%).

The results of calculating the hot spot analysis (*G Getis-Ord) of the resilience of rural settlements using the AHP method show that the center of the hot spots of resilience is located in the northern area of the county along the Sefidrood Valley (north-south). Also, the epicenter of the earthquake resilience cold spots includes most of the villages in the Khorgam district of this county. These points are marked with Z equal to ±3 and their hot and cold spots are significant with 95% confidence. In a part of the mountainous area of this county, the meaninglessness of hot spot analysis is quite clear, indicating the mediocre resilience of rural areas in this part. A small number of villages are located in the Z range of +2 or -2, and in general,

most hot and cold spots are observed in a cluster pattern in the plain and mountainous areas. The results of the weighted sum are not much different from the analytic hierarchy process model, and the rules governing hot spot analysis in the AHP model also apply to the WS model. Therefore, out of 151 villages in this county, 25 villages are among the cold spots at a 99% confidence level and 26 villages are among the hot spots at a 99% confidence level in the analytic hierarchy process model. This was also obtained for the weighted sum model, equal to 30 and 34 villages for cold and hot spots, respectively. The analysis of hot spots shows that 65 and 54 villages behaved randomly in the hierarchical analysis and weighted sum model, respectively, against earthquakes, and their resilience was average in both methods.

Conclusion

The aim of this paper is to identify the spatial pattern governing the resilience of rural settlements in Rudbar County against earthquakes. Considering the very severe experience of the earthquake of June 21, 1980, it should be said that earthquakes are still considered a serious danger for this county due to the moderate to low resilience of rural settlements. It should also be said that topography is one of the effective factors in the spatial distribution of vulnerability and physical resilience to earthquakes in this county. In other words, the mountainous areas of this region have high vulnerability and low resilience to earthquakes, and this increases towards the foothills and plains. As a result, the level of development of areas in various dimensions (physical, economic, social, etc.) has a direct impact on the level of resilience, and this issue works completely the opposite in the studied area with altitude. Therefore, it is necessary for the responsible organizations to pay special attention to the issue of earthquakes and to strengthen residential buildings against earthquakes in the mountainous and foothill areas of the county. In addition, the construction of rural settlements appropriate to local conditions and their correct location according to various environmental criteria (including slope, slope direction, soil type, geological formation, distance from faults, etc.) are among the issues that must be considered. Another issue related to rural settlements is the use of indigenous architecture with new technology, as well as indigenous and traditional materials, in order to preserve the heritage of past rural settlements in this area, while observing engineering and architectural principles, which must be considered.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴ ، ص ۲۵۰-۲۳۰

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.93316.1569 دسترسی آزاد

تحلیل الگوی مکانی تاب‌آوری کالبدی سکونتگاه‌های روستایی شهرستان رودبار در برابر زلزله

مریم ضرغام‌پور[۱]، تیمور آمار[۲*]، پرویز رضایی[۳]

[۱و۲و۳] گروه جغرافیا واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۲

کلمات کلیدی:

تاب‌آوری کالبدی

سکونتگاه های روستایی

خطر زمین لرزه

شاخص I موران محلی

تحلیل فضایی

تحلیل نقاط داغ

(G^* گتیس-اورد)

چکیده

تاب‌آوری یکی از مفاهیم کلیدی در علم روانشناسی و فیزیک است، که در دهۀ آخر قرن بیستم وارد علم جغرافیا شده و از جنبه‌های مختلف انسانی و طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش تعیین الگوی فضایی میزان تاب‌آوری کالبدی سکونتگاه‌های روستایی در برابر زلزله مد نظر است. بدین منظور از ۱۲ معیار، ۳۶ زیر معیار، روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و جمع وزنی (WS) برای تعیین میزان تاب‌آوری و همچنین دو آماره I موران محلی و تحلیل نقاط داغ (G^* گتیس-اورد) برای نوع الگوی فضایی تاب‌آوری سکونتگاه‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی به روش AHP به ترتیب برابر با ۰/۶۶٪، ۲۴/۱۳٪، ۶۱/۵۹٪، ۴۹/۲۶٪ و ۰٪ و با استفاده از روش WS برابر با ۳۲/۳٪، ۷۷/۳۳٪، ۶۴/۵۵٪، ۲۷/۷٪ و ۰٪ برای گزینه خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به‌دست آمد. الگوی خوشه‌ای بالا - بالا (HH) در ناحیه جلگه‌ای و پایکوهی و الگوی خوشه‌ای پایین - پایین (LL) در ناحیه کوهستانی مشاهده گردید. همچنین الگوی خوشه‌ای HH در انطباق با روستاهای با تاب‌آوری بالا و الگوی خوشه‌ای LL منطبق با روستاهای با تاب‌آوری پایین است. در این راستا، نقاط داغ تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی در ناحیه پایکوهی شمال شهرستان رودبار و نقاط سرد تاب‌آوری نیز در بخش کوهستانی آن یعنی بخش خورگام قرار گرفته است. در مجموع نتایج به‌دست آمده از روش AHP و WS با روش‌های I موران محلی و تحلیل نقاط داغ (G^* گتیس-اورد) یکی بوده و عدم همگنی در میزان تاب‌آوری کالبدی سکونتگاه‌های روستایی در برابر زلزله کاملاً محرز است.

* نویسندۀ مسئول: تیمور آمار

E-mail: amar@iau.ac.ir

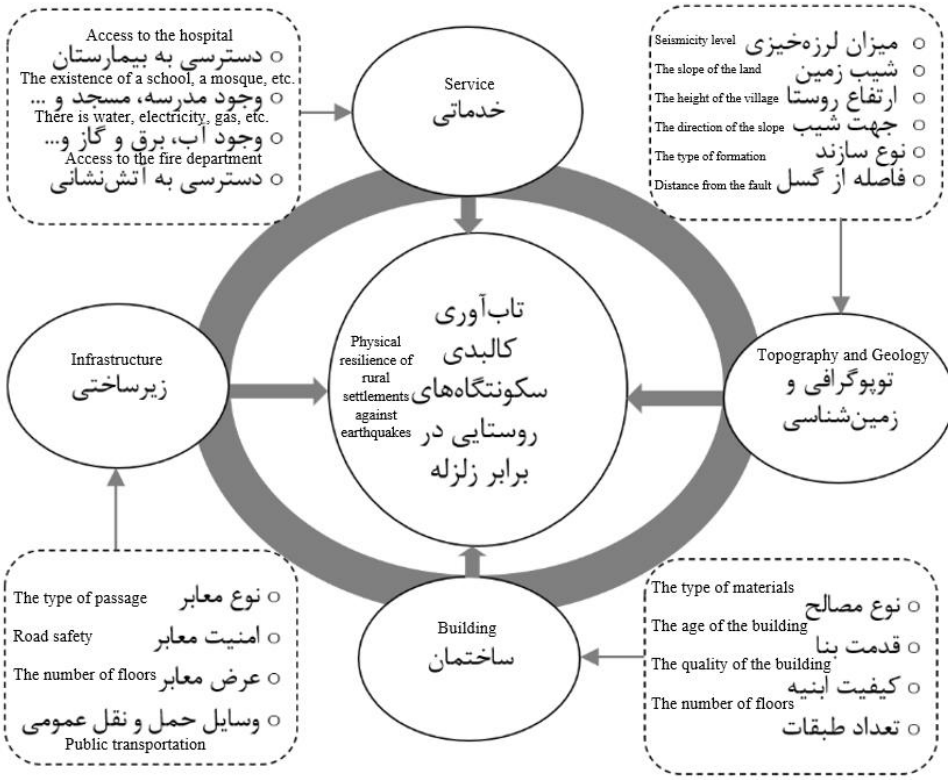
مقدمه

مفهوم تاب‌آوری در برابر مخاطرات طبیعی در حوزه مدیریت بلایا استفاده می‌شود. مدل‌ها و شاخص‌های متعددی برای بررسی تاب‌آوری در برابر مخاطرات طبیعی توسعه و اعمال شده‌اند. با این حال، اکثر مدل‌ها و شاخص‌ها، تفاوت‌ها و الگوهای فضایی را در نظر نمی‌گیرند. بنابراین، نتیجهٔ اکثر مطالعات نمی‌تواند بیانگر دیدگاه فضایی باشد (Sung & Liaw, 2021). تفاوت‌ها و الگوهای فضایی به دلیل اینکه انسان یکی از موضوعات و اجزاء مهم در بلایای طبیعی است غیر قابل چشم‌پوشی هستند. در نتیجه، انسان‌ها با تأثیرگذاری بر تاب‌آوری در برابر مخاطرات طبیعی، تفاوت فضایی ایجاد می‌کنند. تفاوت فضایی به طور قابل توجهی بر تاب‌آوری در برابر مخاطرات طبیعی تأثیر می‌گذارد (Cutter, 2016; Frazier, Thompson, Dezzani & Butsick, 2013; Frigerio et al., 2016). رویکرد بررسی تاب‌آوری در برابر مخاطرات طبیعی را می‌توان با توجه به روش، مقیاس فضایی و هدف به چند نوع تقسیم کرد (Winderl, 2014). اما هدف این پژوهش نیز بررسی الگوی فضایی و تفاوت در میزان تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی در برابر خطر زلزله است. از این‌رو از تحلیل خود همبستگی فضایی که یکی از ایده‌آل‌ترین رویکردهای آماری است برای تشخیص الگوی توزیع فضایی استفاده شده است.

زلزله‌های مخرب و فاجعه‌آمیز چند دههٔ اخیر نشان می‌دهد که ایران کشوری زلزله‌خیز است و هیچ نقطه‌ای از آن از خطر زلزله در امان نیست (Shahabi, Golizadeh & Nayer, 2011). به طور متوسط هر چهار سال یک‌بار در ایران زلزله‌ای شدید رخ می‌دهد که پیامد آن تخریب ۹۷٪ از واحدهای روستایی در منطقهٔ وقوع زلزله است. این خود بیانگر آسیب‌پذیری بالای سکونتگاه‌های روستایی است که در اثر کوچکترین زمین‌لرزه، آثار تخریب در آنها نمایان می‌گردد (Sharifi, Hosseini & Asadi, 2011). تجربه زلزله در ایران نشان می‌دهد که علاوه بر مکان‌گزینی سکونتگاه‌های کشور بدون توجه به توان لرزه‌خیزی محیط، بافت فرسوده و کم دوام روستایی، عدم آمادگی روستاییان برای رویارویی با آن، پایین بودن سطح استفاده از تکنولوژی و غیره، زلزله را تبدیل به بحرانی می‌کند که در صورت وقوع، پیامدی جز تبدیل خانه‌های روستایی به آوار و سایر صدمات جانی و مالی نخواهد داشت (Heydari Sarban, Majnoony Toutakhane & Neghabi, 2016; Yari Hesar & Heidari Sareban, 2016). زلزله ۳۱ خرداد ماه ۱۳۶۹رودبار-منجیل از نظر شدت جزء چهار زلزله بزرگ دنیا و مخرب‌ترین زلزله قرن معاصر در ایران بوده است. در شهر رشت (۵۵ کیلومتری از مرکز زلزله) بر اثر طولانی شدن مدت زمان زلزله و همچنین به خاطر وضعیت خاک، تعدادی از ساختمان‌های بلند (۵ تا ۸ طبقه) به شدت آسیب دید. زلزله همچنین موجب به وجود آمدن پدیده روان‌گرایی در بسیاری از نقاط روستاهای شهرستان رودبار گردید که خسارات عمده‌ای را در این نقاط به بار آورد. صدها زمین‌لغزش نیز باعث گردید که روستاها به کلی تخریب و یا زیر خاک دفن گردیده و باغات و اراضی کشاورزی دچار آسیب کلی شوند. از این جمله می‌توان به زمین‌لغزش گلدیان اشاره کرد که دارای ۲/۵ کیلومتر طول، ۳۵۰ متر عرض و ۵۰ متر افتادگی بوده است. این زمین‌لغزش حدود ۳۵۰ تا ۵۰۰ متر حرکت کرده، نزدیک جادهٔ تهران رشت متوقف می‌شود. بر اثر این زمین‌لغزش لوله اصلی نفت قزوین - رشت شکسته و ده‌ها هکتار درختان با ارزش از بین می‌رود. علاوه بر این، زلزله سنگریزش‌های متعددی را در نقاط کوهستانی منطقه، از قبیل جاده قزوین - لوشان، جاده لوشان-جیرنده، جاده رودبار، حوالی سد سفیدرود به وجود آورد که به نوبه خود خسارات و مشکلات جدیدی را ایجاد کرد (Zargar, Miri & Aghaei, 1994).

طبق گزارش جهانی مخاطرات، روزانه به طور متوسط ۱۳۰۰ نفر بر اثر مخاطرات طبیعی کشته می‌شوند که ۹۸٪ آن مربوط به کشورهای در حال توسعه و به ویژه عرصه‌های روستایی است (Alavi, Ramezannejad, Fatahi & Khalifeh, 2016). موارد اشاره شده و نیز آمارهای جهانی منتشر شده از سوی مراجع بین‌المللی بیانگر اهمیت بررسی میزان تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی در برابر زلزله است. کالبد سکونتگاه‌های روستایی بستری برای عملکرد اقتصادی و اجتماعی آنهاست، بنابراین آسیب‌پذیری کالبد سکونتگاه‌های روستایی باعث افزایش آسیب‌پذیری و کاهش تاب‌آوری سایر ابعاد ساختار روستایی می‌شود. مطالعات انجام شده بر

روی تاب‌آوری در برابر زلزله که بر تعاملات انسان و طبیعت متمرکز بوده، ابعاد مختلف این مسئله را از جنبه اجتماعی، اقتصادی، طبیعی، روان‌شناسی، جغرافیا، مدیریت ریسک و مطالعات ارتباطی در برمی‌گیرد (Cutter, 2014; Aldrich, 2011; Chang, McDaniels, Fox, Dhariwal & Longstaff, 2014; Feder et al., 2013). برخی از محققان تلاش کرده‌اند تا به طور کیفی تاب‌آوری پس از زلزله را بررسی کنند. برخی مدل مفهومی با رابط تعامل انسان - کامپیوتر برای توصیف روابط بین جوامع، خطوط حیاتی و خانوارها در بازیابی پس از زلزله ساختند. برخی دیگر از داده‌های پرسشنامه‌ای برای بررسی میزان تاب‌آوری جامعه در برابر زلزله از چهار منظر امنیت اجتماعی، شرایط اقتصادی، امکانات ساخت‌وساز و سیستم کاهش بلایا استفاده کردند. با توجه به هدف مورد نظر پژوهشگران، هیچ نتیجه‌گیری واحدی در مورد چگونگی تعریف تاب‌آوری وجود ندارد (Miles & Chang, 2006; Ainuddin & Routray, 2012). علاوه بر تمرکز بر یک تعریف مفهومی، مطالعاتی که معیارهای کمی تاب‌آوری در مخاطرات را توسعه می‌دهند، قانع‌کننده‌تر هستند، زیرا به کاهش خطر برای بهبود تاب‌آوری یک جامعه کمک می‌کنند (Liu, Zhang, Li & Chen, 2021). متأسفانه، کمی کردن پارامترهای تاب‌آوری در زیرسیستم‌های چندوجهی کار آسانی نبوده و پژوهشگران ترجیح می‌دهند به جای آن بر شاخص‌های اقتصادی یا جمعیتی تأکید کنند (Noy & DuPont, 2018). اما تأکید بر مفهوم آمادگی و مقاومت به جای بازیابی در تاب‌آوری به نوعی نگرش ما را نسبت به موضوع زلزله و تاب‌آوری کالبدی سکونتگاه‌های روستایی تغییر می‌دهد. زیرا به جای پرداخت به اینکه بعد وقوع حادثه چه خواهد شد و آیا شرایط اقتصادی و اجتماعی جامعه روستایی قادر به بازیابی خود بعد از وقوع زلزله خواهد بود، بهتر است که به مسئله تاب‌آوری از نقطه نظر آمادگی و مقاومت نگریسته شود. شکل ۱ مدل مفهومی پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱- مدل مفهومی پژوهش

Fig. 1. Conceptual model of research

مطالعات انجام شده در زمینه تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی نیز بر ابعاد مختلف این موضوع اعم از اجتماعی، اقتصادی، فرهنگی، کالبدی، نهادی و غیره تأکید دارند. به‌عنوان مثال می‌توان به مطالعه در زمینه تاب‌آوری معیشت روستایی از بعد اجتماعی، اقتصادی، محیطی و کالبدی در روستاهای ناحیه سایونگ[1] اندونزی (Rudiarto, Handayani, Wijaya & Insani, 2019)، تحلیل الگوی فضایی رابطه بین آسیب‌پذیری و تاب‌آوری در برابر مخاطرات طبیعی در شمال شرق تایوان (Sung & Liaw, 2021)، تاب‌آوری سیستم سکونتگاه‌های انسانی روستایی چین (Ge, Zheng, Zhang, Fu & Su, 2022)، تحلیل فضایی تاب‌آوری اقتصادی کشاورزی در انگلستان و ولز (Berry, Vigani & Urquhart, 2022)، ارزیابی آمادگی معیشتی در برابر زلزله در کایکورای[2] نیوزیلند (Kwazu & Chang-Richards, 2022)، توزیع مکانی و زمانی بلایا در چین (Su, Liu, Dai, Chen, Zhang & Wang, 2023)، توزیع فضایی عوامل موثر بر بلایای زمین‌شناختی نواحی کوهستانی جنوب غربی چین (Shu, Chen, Amani-Beni & Zhang, 2022) و غیره اشاره کرد. در این راستا، پژوهشگران داخلی هم در زمینه تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی مطالعات زیادی انجام داده‌اند که از جمله تحلیل فضایی تاب‌آوری اجتماعی و اقتصادی سکونتگاه‌های روستایی آوج در برابر مخاطره زلزله (Fakhrghazi, Pourramzan & Molaei Hashtjin, 2021a; Fakhrghazi, Pourramzan & Molaei Hashtjin, 2021b)، تحلیل فضایی تاب‌آوری کالبدی سکونتگاه‌های روستایی شهرستان مریوان در برابر مخاطره زلزله (Badri, Karimzadeh, Saadi & Kazemi, 2019)، تخمین فضایی آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های تهران در برابر زلزله (Faraji Sabokbar, Badri & Tahmasi, 2021)، تحلیل الگوی فضایی آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های روستایی شهرستان مرند در برابر زلزله (Zakeri-e-Miyab & Aghayari-e-Hir, 2016)، تحلیل و تبیین تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی شهرستان شیراز در برابر زلزله (Akbarian Ronizi, Negahban & Zare, 2024) و عوامل مؤثر بر تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی شهرستان ماهنشان در برابر خشکسالی (Mohammadloo, Rahmani Fazli, Sajadi & Charaghi, 2025) را شامل می‌شوند. با توجه به بررسی پیشینه مطالعاتی مشخص شد که در زمینه تاب‌آوری روستاها در مواجهه با بلایای طبیعی مطالعات گسترده‌ای انجام شده است. اما استفاده از روش‌های آمار فضایی مثل شاخص I موران محلی (ALMI) یا تحلیل نقاط داغ (آماره G_i^* گتیس-اورد) و همچنین استفاده از دو روش وزنی‌دهی یعنی تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و جمع وزن‌ها (WS) در تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی به منظور مقایسه نتایج این دو روش در ناحیه مورد مطالعه، کاری نو محسوب می‌شود.

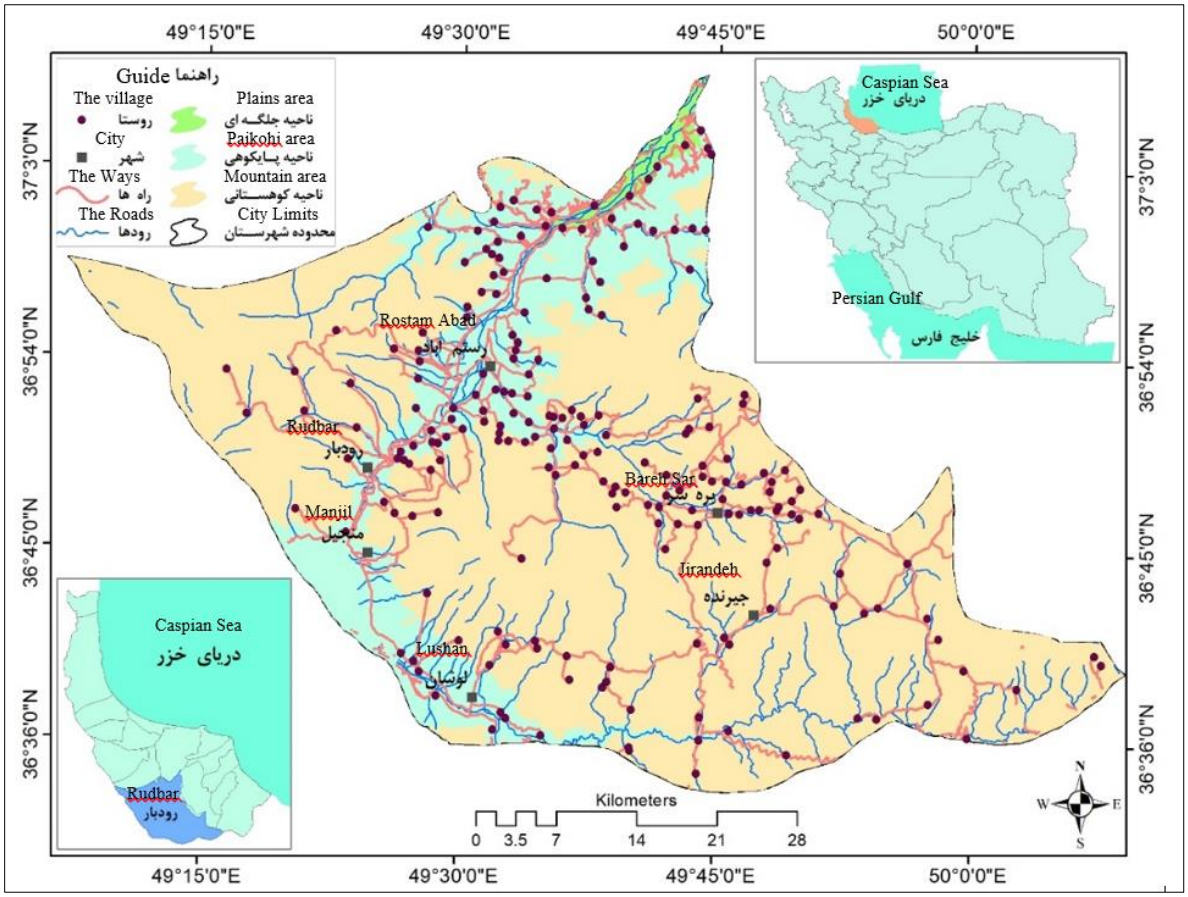
به نظر می‌رسد به دلیل سکونت بیش از ۲۰ میلیون نفر از جمعیت کشور در روستاها و وجود انواع مخاطرات طبیعی و انسانی در فضاهای روستایی این موضوع در آینده نیز اهمیت بیشتری پیدا کند، به همین دلیل در این پژوهش به بررسی و تحلیل در مورد یکی از بخش‌های آن پرداخته می‌شود. در واقع این پژوهش به دنبال شناخت الگوی فضایی میزان تاب‌آوری کالبدی نواحی روستایی شهرستان رودبار در برابر زلزله است، و پاسخ به سؤال «تاب‌آوری کالبدی سکونتگاه‌های روستایی شهرستان رودبار در برابر زلزله تا چه اندازه است» مد نظر می‌باشد.

منطقهٔ مورد مطالعه

شهرستان رودبار در مختصات جغرافیایی ′۳۲ °۳۶ تا ′۰۷ °۳۷ عرض شمالی و ′۱۱ °۴۹ تا ′۰۵ °۵۰ طول شرقی واقع شده است. این شهرستان با وسعت ۲۵۷۴ کیلومتر مربع وسیع‌ترین شهرستان استان گیلان است و از شمال به رشت، از جنوب به استان قزوین و از غرب به شفت و استان زنجان محدود می‌شود. طبق آخرین سرشماری تقسیمات اداری سال ۱۳۹۵، دارای ۴ بخش مرکزی، عمارلو، خورگام و رحمت‌آباد و بلوکات است که بخش مرکزی دهستان‌های رستم‌آباد شمالی، رستم‌آباد جنوبی و کلشتر، بخش عمارلو دهستان‌های جیرنده و کلیشم، بخش خورگام دهستان‌های خورگام و دلفک و در نهایت بخش رحمت‌آباد و بلوکات نیز دهستان‌های بلوکات، رحمت‌آباد و دشتویل را شامل می‌شوند. این شهرستان با ۱۰۰۹۴۳ نفر جمعیت دارای ۳۰۳۵۰ خانوار بوده و

1- Sayung
2- Kaikoura

۴٪ از کل جمعیت استان گیلان را به خود اختصاص داده است. همچنین ۱۵۱ روستای دارای سکنه براساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن در این شهرستان وجود دارد. در شکل ۲ نقاط روستایی شهرستان رودبار نشان داده شده است (Management and Planning Organization of Guilan Province, 2025).



شکل ۲- موقعیت شهرستان رودبار در استان و کشور به همراه روستاهای واقع در آن

Fig. 2. Location of Rudbar County along with the villages located there

مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای تعیین الگوی فضایی میزان تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی شهرستان رودبار در برابر زلزله، نخست معیارها و زیرمعیارهای موثر در تاب‌آوری کالبدی سکونتگاه‌های روستایی با کمک اساتید و پژوهش‌های انجام شده در این حوزه شناسایی گردید. سپس زیرمعیارهای هر معیار به سه طبقه با میزان تاب‌آوری کم، متوسط و بالا طبقه‌بندی شد (جدول ۱). در همین راستا، میزان اثر هر معیار در میزان تاب‌آوری نهایی به ترتیب اهمیت مشخص و کد ترجیحی هر زیر معیار تعیین گردید، که بترتیب از ترجیح بالاتر به سمت ترجیح پایین‌تر (۷، ۵ و ۳) تغییر می‌کند. در این پژوهش از مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای مشخص نمودن میزان تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی و همچنین از روش‌های آمار فضایی جهت شناسایی نوع الگوی فضایی استفاده شد.

جدول ۱- تعیین معیارها، زیر معیارها و کدگذاری آن جهت تعیین میزان تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی در مقابل زلزله

Table 1- Identification of Criteria, Sub-Criteria, and Their Coding for Assessing the Earthquake Resilience of Rural Settlements

ردیف (Row)	مولفه (Component)	شاخص(Indicator)	زیرشاخص(Sub-indicator)	میزان تاب‌آوری (Resilience Level)
1	توپوگرافیکی و زمین-شناختی (Topographic and Geological)	میزان لرزه‌خیزی (Seismicity)	(Low Intensity) شدت کم	بالا(High)
			(Medium) متوسط	متوسط(Medium)
			(High) زیاد	کم(Low)
2		(Slope) شیب زمین	(0 to 20 percent) تا ۲۰ درصد ۰	بالا(High)
			(20 to 45 percent) تا ۴۵ درصد ۲۰	متوسط(Medium)
			(More than 45 percent) بیشتر از ۴۵ درصد	کم(Low)
3		(Village Elevation) ارتفاع روستا	(Plain) جلگه‌ای	بالا(High)
			(Foothill) کوهپایه‌ای	متوسط(Medium)
			(Mountainous) کوهستانی	کم(Low)
4		(Slope Direction) جهت شیب	جنوب شرق، جنوب، جنوب غرب، هموار (Southeast, South, Southwest, Flat)	بالا(High)
			(East and West) شرق و غرب	متوسط(Medium)
			(Northeast, North, Northwest) شمال شرق، شمال، شمال غرب	کم(Low)
5		(Type of Formation) نوع سازند	(Resistant Formation) سازند مقاوم	بالا(High)
			(Semi-resistant Formation) سازند نیمه مقاوم	متوسط(Medium)
			(Non-resistant Formation) سازند نامقاوم	کم(Low)
6		(Distance from Fault) فاصله از گسل	(More than 2000 meters) بیشتر از ۲۰۰۰ متر	بالا(High)
			(1000 to 2000 meters) تا ۲۰۰۰ متر ۱۰۰۰	متوسط(Medium)
			(Less than or equal to 1000 meters) کمتر یا مساوی ۱۰۰۰ متر	کم(Low)
7	ساختمان (Building)	(Type of Materials) نوع مصالح	(Durable) با دوام	بالا(High)
			(Semi-durable) نیمه بادوام	متوسط(Medium)
			(Non-durable) کم دوام	کم(Low)
8		(Age of Structure) قدمت بنا	(0 to 10 years) تا ۱۰ سال ۰	بالا(High)
			(10 to 30 years) تا ۳۰ سال ۱۰	متوسط(Medium)
			(More than 30 years) بیشتر از ۳۰ سال	کم(Low)
9		(Quality of Buildings) کیفیت ابنیه	(Under Construction) در حال ساخت و ساز	بالا(High)
			(Habitable and Repairable) قابل سکونت و مرمتی	متوسط(Medium)
			(Demolished) تخریبی	کم(Low)
10	زیرساختی (Infrastructure)	(Road Width) عرض معابر	(More than 12 meters) بیشتر از ۱۲ متر	بالا(High)
			(8 to 12 meters) تا ۱۲ متر ۸	متوسط(Medium)
			(Equal to or less than 8 meters) مساوی یا کمتر از ۸ متر	کم(Low)
11	خدماتی (Services)	سرعت دسترسی به (Access Speed to Hospital) بیمارستان	(Less than 15 minutes) کمتر از ۱۵ دقیقه	بالا(High)
			(15 to 30 minutes) تا ۳۰ دقیقه 15	متوسط(Medium)
			(More than or equal to 30 minutes) بیشتر یا مساوی ۳۰ دقیقه	کم(Low)
12		دسترسی به آتش‌نشانی (Access to Fire Department)	(Less than 15 minutes) کمتر از ۱۵ دقیقه	بالا(High)
			(15 to 30 minutes) تا ۳۰ دقیقه 15	متوسط(Medium)
			(More than or equal to 30 minutes) بیشتر یا مساوی ۳۰ دقیقه	کم(Low)

تحلیل سلسله مراتبی

براساس معیارهای موجود در سلسله مراتب اولیه به عنوان استاندارد ارزیابی معیار در یک سلسله مراتب، مقایسهٔ زوجی بین معیارها برای تعیین اهمیت نسبی بین دو معیار انجام می‌شود. بدین ترتیب نسبت اهمیت معیارها با مقادیر $\frac{1}{9}$ ، $\frac{1}{8}$ تا $\frac{1}{2}$ برای ۱، ۲ تا ۹ تعیین می‌گردد. نتیجهٔ مقایسه زوجی در مثلث بالایی ماتریس زوجی قرار می‌گیرد. قطر اصلی مقایسهٔ معیارها برابر با ۱ است. مثلث پایینی مقابل مثلث بالایی است و ماتریس مقایسه زوجی (A) بصورت رابطه (۱) نشان داده می‌شود.

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & . & . & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & . & . & a_{2n} \\ . & . & 1 & . & . \\ . & . & . & . & . \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & . & . & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1/W_1 & W_1/W_2 & . & . & W_1/W_n \\ W_2/W_1 & W_2/W_2 & . & . & W_2/W_n \\ . & . & 1 & . & . \\ . & . & . & . & . \\ W_n/W_1 & W_n/W_2 & . & . & W_n/W_n \end{bmatrix} \quad (۱)$$

در اینجا a_{ij} مخفف مقایسه متقابل عوامل تصمیم i و j به عنوان اهمیت عوامل تصمیم i و j برای تصمیم‌گیرندگان است. وزن معیارها در سلسله مراتب‌های مختلف پس از به دست آوردن ماتریس مقایسهٔ زوجی محاسبه می‌شود. مقدار ویژه در تحلیل عددی برای تعیین بردار ویژه یا بردار غالب و حداکثر مقدار ویژه ماتریس مقایسه زوجی به کار می‌رود. در این مطالعه، بردار ویژه مستقیماً با AHP محاسبه می‌گردد. محاسبهٔ حداکثر مقدار ویژه و بردار ویژه با استفاده از رابطه (۲) قابل انجام است.

$$W_i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} a_{ij}} \quad (۲)$$

ماتریس مقایسهٔ زوجی A ابتدا در بردار ویژه محاسبه شده W_i ضرب می‌شود تا یک بردار جدید W_i' به دست آورد و میانگین حاصل ضرب این دو نیز مقدار ویژه حداکثر λ_{max} است که به صورت رابطه (۳) نشان داده می‌شود.

$$W_i' = A \times W_i = \begin{bmatrix} W_1/W_1 & W_1/W_2 & . & . & W_1/W_n \\ W_2/W_1 & W_2/W_2 & . & . & W_2/W_n \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ W_n/W_1 & W_n/W_2 & . & . & W_n/W_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ . \\ . \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1' \\ W_2' \\ . \\ . \\ W_n' \end{bmatrix} \quad (۳)$$

$$\lambda_{max} = \left(\frac{1}{n}\right)\left(\frac{W_1'}{W_i} + \frac{W_2'}{W_2} + \cdots + \frac{W_n'}{W_n}\right) \quad (۴)$$

در تحلیل سلسله مراتبی، از شاخص سازگاری (C.I) و نرخ ناسازگاری (I.R) برای اندازه‌گیری سازگاری ماتریس مقایسه زوجی استفاده می‌شود. از این رو، ارزش ماتریس مقایسه زوجی تحت آزمون سازگاری قرار می‌گیرد تا سازگاری ماتریس مقایسه زوجی ساخته شده را آزمایش کند. شاخص سازگاری براساس رابطه (۵) برای ماتریس‌های n بُعدی به دست می‌آید.

$$C.I = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (۵)$$

که در آن λ_{max} حداکثر مقدار ویژه و n تعداد معیارهای ارزیابی است. نرخ ناسازگاری با تقسیم شاخص سازگاری بر شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی $I.I.R_{n\times n}$ محاسبه می‌شود.

$$I.R = \frac{C.I}{I.I.R_{n\times n}} \quad (۶)$$

$I.I.R_{n\times n}$ مقدار شاخص ناسازگاری است که برای ماتریس‌های n بُعدی با اعداد کاملاً تصادفی محاسبه و در جدول ۲ نمایش داده شده است. چنانچه این عدد کوچکتر یا مساوی ۰/۱ باشد بیانگر سازگاری در مقایسات است و اعتبار نظرات کارشناسی تأیید می‌گردد، در غیر این صورت باید در قضاوت‌ها تجدید نظر کرد (Liang & Peng, 2017).

جدول ۲- مقدار شاخص ناسازگاری

Table 2- Inconsistency index value

N	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$I.I.R_{n\times n}$	0.0	0.58	0.9	1.12	1.1	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

آماره I موران محلی

برای شناسایی الگوی حاکم بر میزان تاب‌آوری روستاهای محدودهٔ مورد مطالعه نیز از شاخص I موران محلی و تحلیل نقاط داغ (گتیس اورد) استفاده شد. آماره I موران محلی براساس رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S_i^2} \sum_{j=1, j\neq 1}^{n} w_{ij}\ w_{ij}(x_i - \bar{x}) \qquad (۷)$$

در این رابطه، x_i ویژگی عارضه i و $\bar{x}$ میانگین ویژگی مربوطه و w_{ij} وزن فضایی بین عارضه i و j می‌باشد. مقدار S_i^2 از رابطه (۸) بدست می‌آید.

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1, j\neq 1}^{n} w_{ij}}{n-1} - \bar{x}^2 \qquad (۸)$$

در این رابطه n برابر با تعداد کل عوارض است. در این آماره نمره استاندارد Z محاسبه و در یک سطح اطمینان مورد آزمون قرار می‌گیرد. نمره استاندارد ZI_i به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$ZI_i = \frac{I_i - E[I_i]}{\sqrt{V[I_i]}} \qquad (۹)$$

در این رابطه امید ریاضی $E[I_i]$ برابر با

$$E[I_i] = -\frac{\sum_{j=1, j\neq 1}^{n} w_{ij}}{n-1} \qquad (۱۰)$$

و واریانس $V[I_i]$ برابر با

$$V[I_i] = E[I^2] - E[I_i]^2 \qquad (۱۱)$$

در این تحلیل اگر مقدار I_i مثبت و معنی‌دار باشد بیانگر این است که مناطق موجود توسط مناطق مشابه خود محاصره شده‌اند. مقادیر مثبت I_i نشان‌دهنده این است که منطقه مورد نظر با مقادیر مشخص توسط مناطقی با مقادیر مشابه احاطه شده است (بالا-بالا یا پایین-پایین)، و به اینگونه مناطق خوشه گفته می‌شود. از طرف دیگر مقادیر منفی و معنی‌دار I_i بیانگر آن است که مناطق مورد نظر توسط مناطقی که از لحاظ ارزشی اصلاً شباهتی با یکدیگر ندارند احاطه شده است (بالا-پایین یا پایین-بالا)، که به اینگونه مناطق، ناخوشه گفته می‌شود و وجود چنین مناطقی حاکی از همبستگی فضایی منفی است (Alijani, 2019).

تحلیل نقاط داغ

از تحلیل نقاط داغ (آماره گتیس-اورد) برای نشان دادن عوارض دارای مقادیر بالا یا پایین که به صورت خوشه در فضا مشخص می‌شوند استفاده می‌شود. چگونگی محاسبه آماره محلی گتیس-اورد[1] در رابطه (۱۲) آورده شده است.

1-Getis-Ord

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{n} w_{ij}x_j - \bar{X}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}}{s\sqrt{\frac{\left[n\sum_{j=1}^{n} w_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^{n} w_{ij}\right)^2\right]}{n-1}}} \quad (۱۲)$$

که در آن x_j مقدار ویژگی برای عارضه j است، w_{ij} وزن فضایی بین عارضه i و j است، n برابر با تعداد کل عوارض است. میانگین ($\bar{X}$) و انحراف معیار (S) این آماره بصورت رابطه‌های (۱۳) و (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^{n} x_j}{n} \quad (۱۳)$$

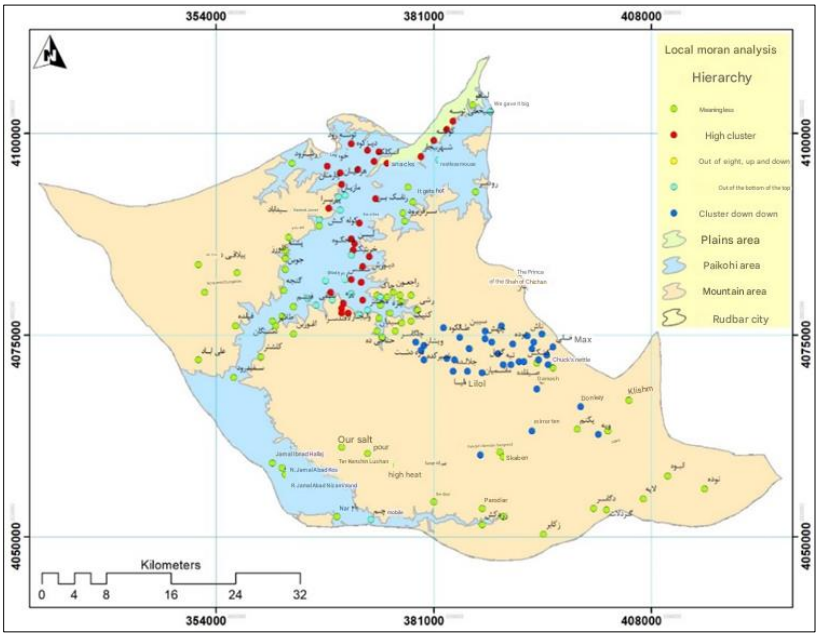
$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n} x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (۱۴)$$

آمار G_i^* نوعی نمره Z محسوب می‌شود به طوری که نمرات Z مثبت، معنی‌داری آماری مقادیر بالا (نقاط داغ) و نمرات Z منفی، معنی‌داری آماری مقادیر پایین (نقاط سرد) را تأیید و نشان‌دهندهٔ خوشه‌بندی فضایی نقاط با مقادیر بالا و پایین هستند (Roshani, Rezaie & Ganji Goufali, 2021).

نتایج و بحث

در شکل ۳ خوشه‌ها و ناخوشه‌های فضایی دو شاخص تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و جمع وزنی (WS) به روش I موران محلی نشان داده شده است. نتایج شاخص I موران محلی مقادیر AHP بیانگر آن است که خوشهٔ بالا - بالا (HH) در شمال شرقی محدودهٔ مورد مطالعه قرار دارد. به عبارت دیگر روستاهای با تاب‌آوری بالا در ناحیه جلگه‌ای و پایکوهی شمال شهرستان رودبار در امتداد دره سفیدرود تا رستم‌آباد قابل مشاهده بوده و دارای الگوی خوشه‌ای بالا - بالا (HH) هستند. در این راستا اکثر سکونتگاه‌های روستایی بخش خورگام شهرستان رودبار نیز دارای الگوی خوشه‌ای پایین - پایین (LL) بوده و در مقابل زلزله از تاب‌آوری کمتری برخوردارند. همچنین اکثر روستاهای واقع در ناحیه پایکوهی این شهرستان دارای تاب‌آوری متوسط در برابر زلزله بوده و دارای رفتار تصادفی هستند. تعدادی روستاها از الگوی خاصی پیروی نکرده و جزء روستاهای برون‌هشته بالا و پایین محسوب می‌شوند. روستاهای برون‌هشته پایین - بالا (LH) در بخش شمالی شهرستان رودبار در مجاورت با خوشه HH قرار گرفته و در امتداد دره سفیدرود تا شهر رستم‌آباد استقرار دارند.

در جدول ۳ بخشی از خروجی آماره I موران محلی میزان تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی شهرستان رودبار با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی آورده شده است. در این جدول مقدار شاخص I موران محلی، نمره Z، مقدار P value، نوع الگو و تعداد روستاهای همسایه با شرایط مشابه هر الگو قابل مشاهده است. همانگونه که از جدول پیداست مقدار I موران محلی برای ۱۵۱ روستای دارای سکنه محاسبه شده است. معنی‌داری یا عدم معنی‌داری یک الگو نیز از طریق مقایسه مقدار P value با مقدار $\alpha = 0.05$ تعیین می‌شود. اگر مقدار P value کمتر از ۰/۰۵ باشد در این حالت الگوی مورد نظر برای میزان تاب‌آوری مشخص می‌شود. به عنوان مثال الگوی بالا - بالا (HH) به معنی آن است که روستاهای با تاب‌آوری بالا توسط روستاهای با تاب‌آوری بالا احاطه شده‌اند یا الگوی پایین - پایین (LL) به معنی آن است که روستاهای با تاب‌آوری پایین توسط روستاهای با تاب‌آوری پایین احاطه شده‌اند. در جدول ۴ تعداد روستاها و نوع الگوی شناسایی شده برای هر کدام از آنها در شهرستان رودبار نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود از ۱۵۱ روستای واقع در این شهرستان، ۶۹ روستا دارای رفتار تصادفی (۴۵/۷ درصد)، ۲۹ روستا دارای الگوی بالا - بالا (۱۹٪/۲)، صفر روستا دارای الگوی بالا - پایین (۰٪)، ۱۸ روستا دارای الگوی پایین - بالا (۱۱/۹٪) و ۳۵ روستا دارای الگوی پایین - پایین (۲۳٪/۲) هستند. همانگونه که قبلاً گفته شد الگوی بالا - بالا و پایین - پایین نیز به صورت خوشه در پهنه شهرستان رودبار ظاهر شده‌اند، که خوشهٔ بالا - بالا در ناحیهٔ جلگه‌ای و پایکوهی و خوشهٔ پایین - پایین در ناحیهٔ کوهستانی مشاهده می‌شود.



شکل ۳- شاخص I موران محلی میزان تاب‌آوری روستاهای شهرستان رودبار در برابر زلزله با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

Fig. 3. Local Moran's I Index of Earthquake Resilience for Rural Settlements in Rudbar County Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) Method

جدول ۳- بخشی از جدول خروجی آماره موران محلی مقادیر تاب‌آوری روستاهای شهرستان رودبار به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

Table 3- Excerpt of Local Moran's I Statistics Output for the Earthquake Resilience Values of Rural Settlements in Rudbar County Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) Method

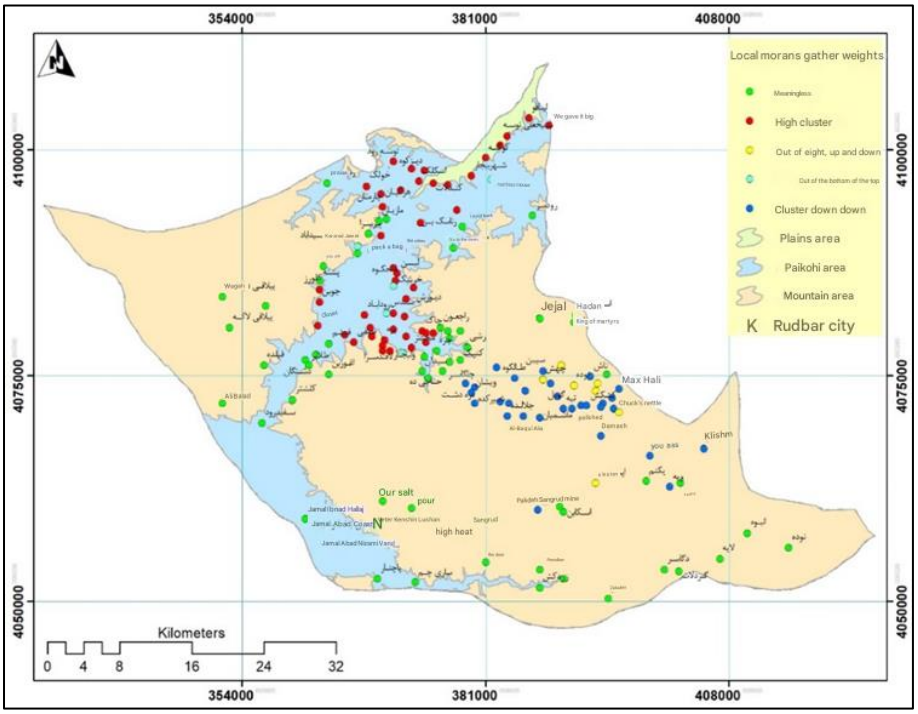
AHP value	Local Moran I Index	Z-score I index	PV value	Pattern type	Number of neighbors
6	0.0009	1.403	0.082	-	3
5	-0/0002	-2.310	0.002	LH	3
6	0.0028	2.211	0.014	HH	6
6	0.0031	2.147	0.014	HH	6
6	0.0020	1.892	0.034	HH	5
6	0.0042	3.665	0.002	HH	8
6	0.0061	3.846	0.002	HH	10
6	0.0061	3.664	0.002	HH	11
6	0.0023	1.994	0.014	HH	10
5	-0.0003	-2.539	0.006	LH	7
6	0.0068	3.816	0.002	HH	13
6	0.0004	1.447	0.238	-	1
6	0.0047	2.832	0.002	HH	11
5	-0.0006	-3.233	0.002	LH	12

در شکل ۴ الگوی فضایی میزان تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی شهرستان رودبار به روش جمع وزن‌ها (WS) با آماره I موران محلی نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود الگوی بالا - بالا (HH) روستاهای بخش جلگه‌ای و کوهپایه‌ای و الگوی پایین ـ پایین (LL) روستاهای ناحیه کوهستانی را شامل می‌شود. به طوری‌که الگوی HH روستاهای واقع در بخش شمالی شهرستان رودبار که در راستای دره سفیدرود تا ابتدای رودبار امتداد دارد در برمی‌گیرد. همچنین اکثر روستاهای واقع در ناحیه کوهستانی بخش خورگام شهرستان رودبار نیز دارای الگوی LL بوده و میزان تاب‌آوری آنها در برابر زلزله پایین است.

جدول ۴- تعداد، درصد فراوانی و فراوانی تجمعی روستاهای واقع در حالت‌های مختلف شاخص I موران محلی به روش AHP

Table 4- Number, Percentage, and Cumulative Frequency of Rural Settlements Across Different Local Moran's I Index Categories Using the AHP Method

Type	Number of villages	Percentage of abundance	Cumulative abundance
بی‌معنی (No significant)	69	45.7	45.7
خوشه بالا - بالا (High-High Cluster: HH)	29	19.2	64.9
برون‌هشته بالا - پایین (High-Low Outlier: HL)	0	0	64.9
برون‌هشته پایین - بالا (Low-High Outlier: LH)	18	11.9	76.8
خوشه پایین - پایین (Low-Low Cluster: LL)	35	23.2	100
Total Sum	151	100	



شکل ۴- شاخص I موران محلی میزان تاب‌آوری روستاهای شهرستان رودبار در برابر زلزله با استفاده از روش جمع وزن‌ها (WS)

Fig. 4. Local Moran's I Index of Earthquake Resilience of Rural Settlements in Rudbar County Using the Weighted Sum (WS) Method

در جدول ۵ بخشی از محاسبات شاخص I موران محلی آورده شده است. همچنین در جدول ۶ تعداد، درصد فراوانی و درصد فراوانی تجمعی روستاهای شهرستان رودبار در حالت‌های مختلف آماره I موران محلی آورده شده است. همانگونه که از جدول پیداست از ۱۵۱ روستای این شهرستان، ۶۳ روستا از الگوی خاصی پیروی نمی‌کنند (۴۱٪/۷)، یا دارای رفتار تصادفی و بی‌معنی هستند. در این راستا، ۴۶ روستا از الگوی بالا - بالا (۳۰٪/۵) و ۳۰ روستا از الگوی پایین - پایین (۱۹٪/۹) پیروی می‌کنند. برون هشته‌های بالا - پایین و پایین - بالا به ترتیب ۷ و ۵ روستا را شامل شده و در حدود ۴/۶٪ و ۳/۳٪ از ۱۰۰٪ روستای این شهرستان را در بر می‌گیرند.

جدول ۵- بخشی از جدول خروجی آماره I موران محلی مقادیر تاب‌آوری روستاهای شهرستان رودبار به روش جمع وزن‌ها (WS)

Table 5- Excerpt of Local Moran's I Statistic Output for Earthquake Resilience Values of Rural Settlements in Rudbar County Using the Weighted Sum (WS) Method

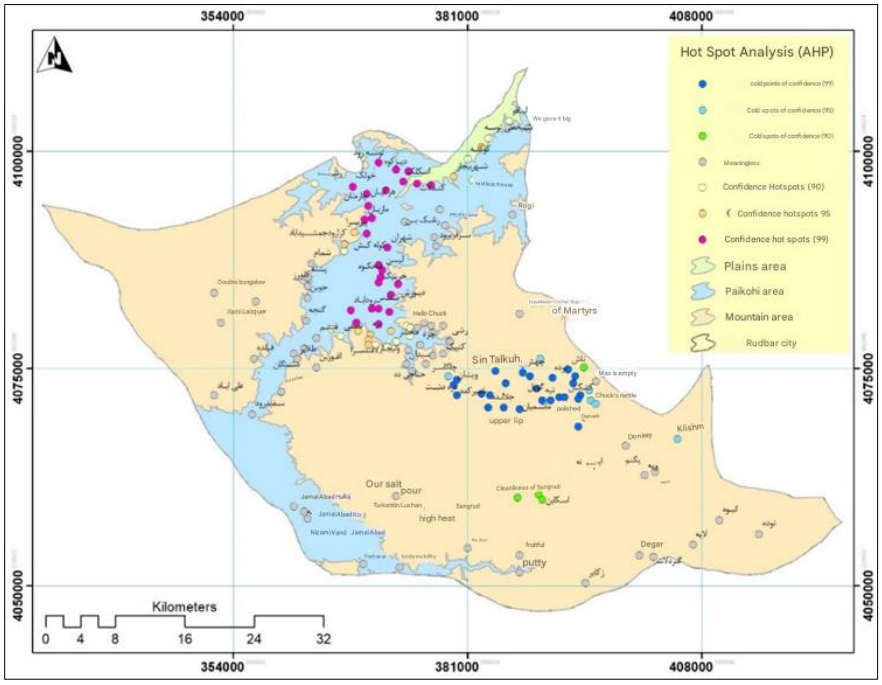
Value WS	Index I Local Moran	Z-score I-index Local Moran	PV value of the I index Local Moran	Pattern type	Number of neighbors
5.88	0.0013	2.0381	0.012	HH	3
5.22	0.0002	2.5885	0.002	HH	3
6.28	0.0042	2.4003	0.006	HH	6
6.24	0.0043	2.3871	0.01	HH	6
5.7	0.0015	2.2391	0.01	HH	5
5.56	0.002	3.5807	0.002	HH	8
6.06	0.0061	3.5308	0.002	HH	10
6.16	0.0072	3.2321	0.002	HH	11
5.8	0.0021	2.2963	0.008	HH	10
4.78	-0.0012	-2.4638	0.006	LH	7
5.76	0.0051	3.4666	0.002	HH	13
5.56	0.0002	1.0557	0.168	-	1
6.16	0.0061	2.9669	0.002	HH	11
5.28	0.0008	3.3954	0.002	HH	12
5.76	0.002	2.1059	0.014	HH	11

جدول ۶- تعداد، درصد فراوانی و فراوانی تجمعی روستاهای واقع در حالت‌های مختلف شاخص I موران محلی به روش WS

Table 6- Number, Percentage Frequency, and Cumulative Frequency of Rural Settlements in Different Local Moran's I Index Categories Using the Weighted Sum (WS) Method

Type	Number of villages	Percentage of abundance	Cumulative abundance
بی‌معنی (No significant)	63	41.7	41.7
خوشهٔ بالا - بالا (High-High Cluster: HH)	46	30.5	72.2
برون‌هشته بالا - پایین (High-Low Outlier: HL)	7	4.6	76.8
برون‌هشته پایین - بالا (Low-High Outlier: LH)	5	3.3	80.1
خوشهٔ پایین - پایین (Low-Low Cluster: LL)	30	19.9	100
Total Sum	151	100	

در شکل‌های ۵ و ۶ نتایج محاسبه تحلیل نقاط داغ (G* گتیس-اورد) میزان تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی شهرستان رودبار در برابر زلزله برای دو مدل AHP و WS نشان داده شده است. همانگونه که گفته شد اگر مقدار Z مثبت و از نظر آماری معنی‌دار باشد، نشان‌دهندهٔ این است که مقدار اطراف نقطه i بالاتر از مقدار متوسط است و به منطقه نقاط داغ با خوشه‌های با ارزش بالا تعلق دارد. در غیر این صورت، متعلق به منطقهٔ لکه سرد با خوشه‌های کم ارزش است. مقدار Z با سطح اطمینان ۹۹، ۹۵ و ۹۰ به ترتیب برابر با ۳±، ۲± و ۱± برای نقاط داغ و سرد بوده و برای نقاط داغ مثبت و نقاط سرد منفی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۵- تحلیل نقاط داغ (G^* گتیس-اورد) تاب‌آوری روستاهای شهرستان رودبار در برابر زلزله با استفاده از روش AHP

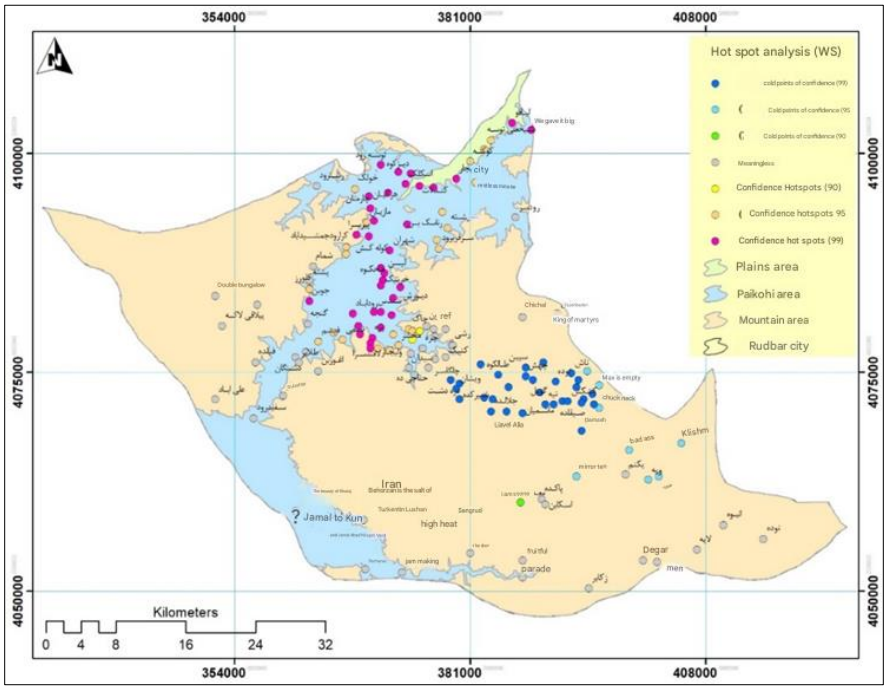
Fig. 5. Hot spot analysis (G^* Getis-Ord) of Earthquake Resilience of Rural Settlements in Rudbar County Using the AHP Method

تحلیل نقاط داغ بر روی میزان تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی شهرستان رودبار به روش تحلیل سلسله مراتبی نشان می‌دهد که کانون نقاط داغ میزان تاب‌آوری در ناحیه شمالی شهرستان در راستای دره سفید (شمالی-جنوبی) قرار دارد. همچنین کانون نقاط سرد میزان تاب‌آوری در برابر زلزله نیز اکثر روستاهای بخش خورگام این شهرستان را در بر می‌گیرد. این نقاط با Z برابر با ۳± مشخص شده و کانون داغ و سرد آنها با اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است. در بخشی از ناحیه کوهستانی این شهرستان بی‌معنی بودن تحلیل نقاط داغ کاملاً واضح بوده و نشان از تاب‌آوری متوسط نقاط روستایی این بخش دارد. تعداد کمی از روستاهای شهرستان در محدوده Z برابر با ۲+ یا ۲- قرار داشته و به طور کلی اکثر نقاط داغ و سرد شهرستان به صورت الگوی خوشه‌ای در ناحیه جلگه‌ای و کوهستانی شهرستان مشاهده می‌شوند (نقاط داغ و سرد در سطح اطمینان ۹۹ درصد به ترتیب به معنی تاب‌آوری بالا و پایین سکونتگاه‌های روستایی در برابر زلزله است).

اجرای تحلیل نقاط داغ بر روی میزان تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی شهرستان رودبار به روش جمع وزنی نشان می‌دهد که نتایج این مدل با مدل تحلیل سلسله مراتبی تفاوت چندانی نداشته و قوائد حاکم بر تحلیل نقاط داغ در مدل AHP در مورد مدل WS صدق می‌کند. به عبارتی نقاط روستایی واقع در بخش شمالی شهرستان در امتداد دره سفیدرود (واقع در ناحیه پایکوهی) از تاب‌آوری بالا در برابر زلزله برخوردار بوده و در سطح اطمینان ۹۹ درصد نیز تاب‌آوری بالا معنی‌دار است. این موضوع در مورد روستاهای بخش خورگام شهرستان رودبار برعکس بوده و سکونتگاه‌های روستایی واقع در این بخش از شهرستان نیز با اطمینان ۹۹ درصد جزو کانون سرد محسوب می‌شوند و دارای تاب‌آوری پایین در برابر زلزله هستند (شکل ۶).

در جدول ۷ خلاصه نتایج تحلیل نقاط داغ میزان تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی شهرستان رودبار بر اساس مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و مدل جمع وزن‌ها (WS) درج شده است. همانگونه که از جدول پیداست از ۱۵۱ روستای این شهرستان، ۲۵ روستا جزو نقاط سرد در سطح اطمینان ۹۹ درصد و ۲۶ روستا جزو نقاط داغ در سطح اطمینان ۹۹ درصد در مدل تحلیل سلسله مراتبی

هستند. این مهم برای مدل جمع وزن‌ها نیز به ترتیب برابر با ۳۰ و ۳۴ روستا برای نقاط سرد و داغ به دست آمد. تحلیل نقاط داغ نشان می‌دهد که به ترتیب ۶۵ و۵۴ روستا در روش تحلیل سلسله مراتبی و جمع وزن‌ها از لحاظ تاب‌آوری در برابر زلزله رفتار تصادفی داشته و میزان تاب‌آوری آنها در هر دو روش متوسط تعیین گردید. در مجموع روستاهای با تاب‌آوری کم در شهرستان رودبار به ویژه نواحی کوهستانی آن لزوم توجه به بهسازی و استحکام ساختمان‌ها در برابر زلزله را بیشتر کرده و این مسئله برای مسئولین کشور در مقیاس ملی باید جدی تلقی شده و به عنوان اولویت اول شهرستان مورد توجه قرار گیرد، زیرا امکان تکرار زلزله ۳۱ خرداد ۱۳۶۹ نیز بعنوان یک فاجعه ملی نیز دور از انتظار نیست. بنابراین تنها راه جلوگیری از صدمات جانی و مالی ناشی از زلزله، توجه ویژه به بحث مقاوم‌سازی و بکارگیری روش‌های نوین ساخت‌وساز در مقابله با این پدیده شوم و نامبارک است.



شکل ۶- تحلیل نقاط داغ (G^* گتیس-اورد) تاب‌آوری روستاهای شهرستان رودبار در برابر زلزله با استفاده از روش WS

Fig. 6. Hot spot analysis (G^* Getis-Ord) of Earthquake Resilience of Rural Settlements in Rudbar County Using the Weighted Sum (WS) Method

جدول ۷- تعداد، درصد فراوانی و فراوانی تجمعی روستاهای واقع در حالت‌های مختلف نقاط داغ ($\mathbf{G^*}$ گتیس-اورد) به روش AHP و WS

Table 7- Number, Frequency Percentage and Cumulative Frequency of Rural Settlements in Different Hot Spot states (G^* Getis-Ord)Categories Using AHP and WS Methods

Type	Analytical Hierarchy Process (AHP)	Percentage of frequency	Cumulative frequency percentage	Weighted sum (WS)	Percentage of frequency	Cumulative frequency percentage
Cold Spots (99%)	25	16.6	16.6	30	19.9	19.9
Cold Spots (95%)	8	5.3	21.9	8	5.3	25.2
Cold Spots (90%)	4	2.6	24.5	1	0.7	25.8
Nonsense	65	43	67.5	54	25.8	61.6
Hot Spots (90%)	14	9.3	76.8	2	1.3	62.9
Hot Spots (95%)	9	6	82.8	22	14.6	77.5
Hot Spots (99%)	26	17.2	100	34	22.5	100
Total	151	100		151	100	

نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش نیز شناسایی الگوی فضایی حاکم بر میزان تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی شهرستان رودبار در برابر زلزله بوده است. در اینجا تاب‌آوری کالبدی سکونتگاه‌های روستایی از چهار رویکرد سازه‌ای، زیرساختی، توپوگرافیکی و زمین‌شناختی و خدماتی در هنگام وقوع زلزله و پس از آن مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور، از دو روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و جمع وزنی (WS) اقدام به تعیین میزان تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی گردید. سپس با استفاده از دو روش I موران محلی و تحلیل نقاط داغ (گتیس - اورد) نوع الگوی ایجاد شده و معنی‌داری آن مشخص شد. نتایج به دست آمده از دو روش I موران محلی و تحلیل نقاط داغ (G^* گتیس - اورد) نشان داد که الگوی خوشه‌ای بالا - بالا (HH) و پایین - پایین (LL) به ترتیب در بخش جلگه‌ای و پایکوهی و بخش کوهستانی شهرستان رودبار مشاهده می‌شود و الگوی خوشه‌ای بالا - بالا منطبق بر روستاهای دارای سکونتگاه‌های با تاب‌آوری بالا و الگوی خوشه‌ای پایین-پایین منطبق بر روستاهای دارای سکونتگاه‌های با تاب‌آوری پایین است (در I موران محلی). همچنین با سطح اطمینان ۹۹ درصد نقاط داغ میزان تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی شهرستان رودبار در ناحیه پایکوهی شمال شهرستان قرار داشته و با سطح اطمینان ۹۹ درصد نقاط سرد میزان تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی این شهرستان در بخش کوهستانی آن یعنی بخش خورگام قرار گرفته است. در مجموع نتایج به دست آمده از روش تحلیل سلسله مراتبی و جمع وزن‌ها با روش‌های آمار مکانی از قبیل شاخص I موران محلی و تحلیل نقاط داغ (G^* گتیس-اورد) همخوانی داشته و عدم همگنی میزان تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی در برابر زلزله کاملاً محرز است. الگوی فضایی شناسایی شده به همراه توزیع فضایی میزان تاب‌آوری سکونتگاه‌ها نشان می‌دهد که مناطق کوهستانی (به ویژه خورگام با تراکم روستایی بالا) توسعه نسبتاً پایینی در حوزهٔ تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی در برابر زلزله دارند. نتایج به دست آمده از این پژوهش با نتایج پژوهش‌های فرجی سبک‌بار و همکاران (Faraji Sabokbar et al., 2021) و بدری و همکاران (Badri et al., 2019) همسو است زیرا هر دو پژوهش بر تاب‌آوری کم روستاها تأکید داشته و معتقدند که کیفیت پایین ساخت‌وساز و اسکلت نامناسب بناها باعث کاهش تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی شده است. با توجه به مطالب گفته شده و همچنین تجربهٔ بسیار سنگین زلزله ۲۹ خرداد ۱۳۶۹ باید گفت این مخاطره با توجه به تاب‌آوری متوسط به پایین سکونتگاه‌های روستایی، هنوز خطری جدی برای این شهرستان محسوب می‌شود. در نهایت باید گفت که توپوگرافی یکی از عوامل مؤثر در توزیع مکانی آسیب‌پذیری و تاب‌آوری کالبدی در برابر زلزله در شهرستان رودبار است. به عبارت دیگر نواحی کوهستانی این ناحیه از آسیب‌پذیری بالا و تاب‌آوری کم در برابر زلزله برخوردار بوده و این مهم به سمت نواحی پایکوهی و جلگه‌ای افزایش می‌یابد. در نتیجه سطح توسعه‌یافتگی نواحی از ابعاد مختلف (کالبدی، اقتصادی، اجتماعی و ...) تأثیر مستقیم بر میزان تاب‌آوری دارد، و این مسئله در ناحیهٔ مورد بررسی با ارتفاع کاملاً برعکس عمل می‌کند. از این رو لزوم توجه ویژه سازمان‌های متولی به موضوع زلزله و مستحکم‌سازی ساختمان‌های مسکونی در برابر زلزله را در مناطق کوهستانی و کوهپایه‌ای شهرستان دوچندان می‌کند. علاوه بر این، احداث سکونتگاه‌های روستایی متناسب با شرایط بومی و مکان‌گزینی صحیح قرارگیری آنها با توجه به معیارهای مختلف محیطی (از جمله شیب، جهت شیب، نوع خاک، سازند زمین‌شناسی، فاصله از گسل و ...) از جمله مواردی است که باید لحاظ گردد. مسئلهٔ دیگر در ارتباط با سکونتگاه‌های روستایی نیز به کارگیری معماری بومی با تکنولوژی جدید و همچنین مصالح بومی و سنتی بصورت توامان در راستای حفظ میراث سکونتگاه‌های روستایی گذشته در این ناحیه با رعایت اصول مهندسی و معماری است که باید مورد توجه قرار بگیرد.

References

Ainuddin, S., & Routray, J. K. (2012). Community resilience framework for an earthquake prone area in Baluchistan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *2*, 25-36. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2012.07.003

Akbarian Ronizi, S. R., Negahban, S., & Zare, N. (2024). The Analysis of Resilience of Rural Settlements against Earthquakes Case: Shiraz County. *Regional Planning*, *14*(53), 95-108. [In Persian] https://doi.org/10.30495/jzpm.2022.30996.4152

Alavi, A., Ramezannejad, Y., Fatahi, A., & Khalifeh, E. (2016). Spatial zone of Rural Settlements Expose to Environmental Disasters by Using Multi- criteria Decision-Making Techniques VIKOR (Case Study: Talesh County). *Regional Planning*, *5*(20), 125-136. [In Persian]

Aldrich, D. P. (2011). The power of people: Social capital's role in recovery from the 1995 Kobe earthquake. *Natural Hazards*, *56*(3), 595–611. https://doi.org/10.1007/s11069-010-9577-7

Alijani, B. (2019). *Quantitative Methodology in Geography*. Tehran: SAMT Press. [In Persian]

Badri, S. A., Karimzadeh, H., Saadi, S., & Kazemi, N. (2019). Analysis of Rural Settlements Resilience against Earthquake (Case Study: Marivan County). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, *6*(1),1-16. [In Persian] http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.6.1.1

Berry, R., Vigani, M., & Urquhart, J. (2022). Economic resilience of agriculture in England and Wales: a spatial analysis. *Journal of Maps*, *18*(1), 70-78. https://doi.org/10.1080/17445647.2022.2072242

Chang, S. E., McDaniels, T., Fox, J., Dhariwal, R., & Longstaff, H. (2014). Toward disaster-resilient cities: Characterizing resilience of infrastructure systems with expert judgments. *Risk Anal*, *34*(3), 416–434. https://doi.org/10.1111/risa.12133

Cutter, S. L. (2016). The landscape of disaster resilience indicators in the USA. *Natural hazards*, *80*(2), 741-758. https://doi.org/10.1007/s11069-015-1993-2

Fakhrghazi, M., Pourramzan, E., & Molaei Hashtjin, N. (2021a). Explaining the economic resilience of rural settlements in Avaj city against environmental hazards emphasizing earthquakes. *Space Economy & Rural Development*, *11*(41), 57-76. [In Persian] http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222131.1401.11.41.4.1

Fakhrghazi, M., Pourramzan, E., & Molaei Hashtjin, N. (2021b). Spatial Analysis of Social Resilience of Rural Settlements against Earthquake Risk (Case study: villages of Avaj city). *Geographical Engineering of Territory*, *6*(2), 309-325. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.25381490.1401.6.11.1.8

Faraji Sabokbar, H., Badri, S. A., & Tahmasi, B. (2021). Spatial Assessment of Vulnerability to Earthquake in Rural Settlements Using a Fuzzy Inference System (Case Study: Rural Settlements in the Tehran Metropolitan Area). *Journal of Sustainable Rural Development*, *5*(2), 175-188. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.25383876.2021.5.2.1.7

Feder, A., Ahmad, S., Lee, E. J., Morgan, J. E., Singh, R., Smith, B. W., ... & Charney, D. S. (2013). Coping and PTSD symptoms in Pakistani earthquake survivors: Purpose in life, religious coping and social support. *Journal of Affective Disorders*, *147*(1-3), 156-163. https://doi.org/10.1016/j.jad.2012.10.027

Frazier, T. G., Thompson, C. M., Dezzani, R. J., & Butsick, D. (2013). Spatial and temporal quantification of resilience at the community scale. *Applied Geography*, *42*, 95-107. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.05.004

Frigerio, I., Ventura, S., Strigaro, D., Mattavelli, M., De Amicis, M., Mugnano, S., & Boffi, M. (2016). A GIS-based approach to identify the spatial variability of social vulnerability to seismic hazard in Italy. *Applied Geography*, *74*, 12-22. https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2016.06.014

Ge, D., Zheng, Y., Zhang, Sh., Fu, J., & Su, F. (2022). Spatio-Temporal Pattern and Influence Mechanism of Rural Human Settlements System Resilience: Case from China. *Sustainability*, *14*, 1-24. https://doi.org/10.3390/su142114533

Heydari Sarban, V., Majnoony Toutakhane, A., & Neghabi, M. (2016). Study and Evaluation of the Impact of Resettlement Patterns on Social Capital Changes in Earthquake-Stricken Villages Case study: Varzaqan County Earthquake-Stricken Villages. *Geography and Development*, *14*(43), 51-70. [In Persian] https://doi.org/10.22111/gdij.2016.2478

Kwazu, G. C., & Chang-Richards, A. (2022). A tool to assess livelihood preparedness for disasters: a study of Kaikoura earthquake in New Zealand. *Natural Hazards*, *113*, 745–766. https://doi.org/10.1007/s11069-022-05322-x

Liang, T. C., & Peng, S. H. (2017). Using Analytic Hierarchy Process to Examine the Success Factors of Autonomous Landscape Development in Rural Communities. *Sustainability*, *9*(5), 729. https://doi.org/10.3390/su9050729

Liu, Z., Zhang, J., Li, X., & Chen, X. (2021). Long-Term Resilience Curve Analysis of Wenchuan Earthquake-Affected Counties Using DMSP-OLS Nighttime Light Images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *14*, 10854-10874. http://dx.doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3121789

Management and Planning Organization of Guilan Province. (2025). Deputy Director of Statistics and Information. [In Persian] https://sdimpogl.ir/

Miles, S. B., & Chang, S. E. (2006). Modeling community recovery from earthquakes. *Earthquake Spectra*, *22*(2), 439-458. https://doi.org/10.1193/1.2192847

Mohammadloo, M., Rahmani Fazli, A. R., Sajadi, J., & Charaghi, M. (2025). Factors affecting the resilience of rural settlements in Mahneshan township against drought. *The Journal of Geographical Research on Desert Areas*, *12*(1), 103-116. [In Persian] https://doi.org/10.22034/grd.2024.21879.1623

Noy, I., & DuPont IV, W. (2018). The long-term consequences of disasters: What do we know, and what we still don't. *International Review of Environmental and Resource Economics*, *12*(4), 325–354. https://www.nowpublishers.com/article/Details/IRERE-0104

Roshani, M., Rezaie, P., & Ganji Goufali, S. (2021). *Statistical Analysis of Geographic Information with ArcView GIS and ArcGIS.* (W. S. Wang & J. Lee, Trans.). Jihad Daneshgahi Environmental Research Institute. [In Persian]

Rudiarto, I., Handayani, W., Wijaya, H. B., & Insani, T. D. (2019). Rural Livelihood Resilience: An Assessment of Social, Economic, Environment, and Physical Dimensions. *MATEC Web of Conferences 280*. https://doi.org/10.1051/matecconf /201928001002

Shahabi, H., Golizadeh, M. H., & Nayer, H. (2011). Zoning of Seismic Risk by Spatial Multi Criteria Analysis Method. *Geography and Development*, *9*(21), 65-80. [In Persian] https://gdij.usb.ac.ir/article_581.html

Sharifi, O., Hosseini, S. M., & Asadi, A. (2011). Analysis of Participatory Mechanisms for Rebuilding Damaged Housing Choices Villages in Earthquake-stricken City of Bam. *Journal of Rural Research*, *1*(1), 121-142. [In Persian] https://jrur.ut.ac.ir/article_21828_en.html?

Shu, B., Chen, Y., Amani-Beni, M., & Zhang, R. (2022). Spatial distribution and influencing factors of mountainous geological disasters in southwest China: A fine-scale multi-type assessment. *Frontiers in Environmental Science*, *10,*1049333. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1049333

Su, H., Liu, C., Dai, D., Chen, W., Zhang, Z., & Wang, Y. (2023). Distribution Characteristics and Influencing Factors of the National Comprehensive Disaster-Reduction Demonstration Community in China. *Land*, *12*, 1633. https://doi.org/10.3390/land12081633

Sung, C. H., & Liaw, S. C. (2021). Using Spatial Pattern Analysis to Explore the Relationship between Vulnerability and Resilience to Natural Hazards. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*, 5634. https://doi.org/10.3390/ijerph18115634

Winderl, T. (2014). Disaster resilience measurements: stocktaking of ongoing efforts in developing systems for measuring resilience. *United Nations Development Programme (UNDP)*, *12*(2), 355-367.

Yari Hesar, A., & Heidari Sareban, V. (2016). Evolution of Development Projects Role in Vulnerability Decrease of Villages after Earthquake (Case Study: Varzeghan County). *Geographic Space*, *16*(54), 324-305. [In Persian]

Zakeri-e-Miyab, K., & Aghayari-e-Hir, M. (2016). Spatial Pattern Analysis of Rural Settlements in Connection with the Earthquake Vulnerability (Case Study: Central District of Marand County). *Journal of Research and Rural Planning*, *5*(3), 61-74. [In Persian] https://doi.org/10.22067/jrrp.v5i3.46183

Zargar, A., Miri, S. H., & Aghaei, M. (1994). *Typology of rural housing in Gilan according to type of architecture and materials*. Islamic Revolution Housing Foundation, Center for Studies on Natural Disasters - Iran, Plan to Mobilize the Country's Technical Capacity in Rebuilding Earthquake-Stricken Areas. [In Persian]

Vol.14, No.4, Winter 2025, p. 251-272 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94244.1592 OPEN ACCESS

Assisted Migration and Protected Area Boundary Adjustment as Climate Adaptation Strategies to Supporting the Survival of TSD Reptiles (Lessons from *Crocodylus Palustris*)

Malihe Erfani [1]*, Abdolrassoul Salmanmahiny [2]

[1] Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran
[2] Department of Environmental Sciences, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 14 July 2025

Revised: 24 August 2025

Accepted: 04 September 2025

Available Online: 10 September 2025

Keywords:

Climate Change

Temperature-dependent Sex Determination (TSD)

Habitat Suitability Modeling

Assisted Migration

Climatic Refugia

Human/Crocodile Conflicts

ABSTRACT

Climate change can have profound impacts on aquatic ecosystems and associated species, particularly reptiles with temperature-dependent sex determination (TSD). This study aimed to evaluate assisted migration and adjustments to protected area boundaries as strategies to support the survival of the marsh crocodile (*Crocodylus palustris* Lesson, 1831) under climate change. To this end, changes in habitat suitability were projected under four climate scenarios up to 2070 to identify potential climatic refugia. Modeling results indicated that a portion of the Gando Protected Area would remain suitable under the RCP2.6 scenario, whereas the entire area would become unsuitable under other scenarios. Consequently, reliance on current protected area management alone is insufficient for species conservation, emphasizing the necessity of assisted migration. Accordingly, a revised boundary for the Gando Protected Area was proposed based on the results, incorporating climatic refugia, population critical zones, potential human crocodile conflict areas, and natural watershed boundaries. Permanent monitoring plots were also established, and priority sites for feasibility studies on species translocation to new habitats were mapped.

* Corresponding author: Malihe Erfani E-mail address: maliheerfani@uoz.ac.ir

How to cite this article: Erfani, M., & Salmanmahiny, A. (2025). Assisted Migration and Protected Area Boundary Adjustment as Climate Adaptation Strategies to Supporting the Survival of TSD Reptiles (Lessons from *Crocodylus Palustris*). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 14*(4), 251-272. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.94244.1592

©2025 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

Climate change is an inevitable ecological change that can significantly impact aquatic ecosystems and their dependent species, particularly reptiles with temperature-dependent sex determination (TSD). Therefore, this study aimed to evaluate assisted migration and adjustments to protected area boundaries as strategies to support the survival of the marsh crocodile (*Crocodylus palustris* Lesson, 1831) under the influence of climate change.

Material and Methods

Southeast Iran was selected as the study area, which includes the northwesternmost extent of the global distribution of the marsh crocodile. For this purpose, changes in the suitable habitat range of the marsh crocodile under four climate scenarios (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5) through the year 2070 were projected using maximum entropy modeling (MaxEnt) and bioclimatic variables from the KGClim_V1 data bank. The MTSS threshold was used to classify the habitat suitability layer based on historical data and future scenarios. The common suitable areas in historical and future data indicated climatic refuges for this species.

By overlaying Boolean layers representing potential changes in habitat suitability due to climate change with the Gando Protected Area layer- as the species' main habitat- the feasibility of future species conservation was assessed through the designation of restoration zones or boundary adjustments of protected areas. The network of protected areas was also examined in supporting the survival of the species in the future.

In addition to analyzing the population trend using previous studies and expert opinions from field observations, critical population areas were also mapped based on changes in habitat suitability. For this purpose, based on the Boolean layers of historical and future habitat suitability, zones were classified from low-risk (suitable under both historical and all four future scenarios) to high-risk (suitable only under the historical and one future scenario).

To identify potential future human/crocodile conflicts, settlements (cities and villages) and road networks were overlaid with historically and future-predicted suitable habitat areas (areas common across all four climate scenarios).

Based on the results and the natural boundaries of watersheds, a revised boundary for the Gando Protected Area was proposed.

Also, permanent population monitoring plots for the species were identified in this area based on the results of the modeling and the species' presence. Finally, priority areas for conducting local studies on assisted migration were identified within the main watershed of the species' distribution and its neighboring watershed.

Results and Discussion

The modeling results showed that in all climate scenarios, an increase in the area of the suitable habitat area is expected by 2070, with the largest increase in the RCP2.6 scenario and the smallest in RCP6.0. It was also predicted that part of the Gando Protected Area would fall outside the suitable habitat under RCP2.6, and the entire area would become unsuitable under the other scenarios. Similarly, other protected areas will not fall within the projected suitable habitat areas.

Consequently, depending only on the management of protected areas or establishing restoration zones within them will not be enough to conserve this species. This phenomenon is attributed to temperature-dependent sex determination (TSD) in the species, where fluctuations in temperature can influence the sex ratio of hatchlings, potentially resulting in long-term changes in the population's structure and composition. Therefore, revising protected area boundary and implementing management strategies that support the assisted migration of this species are necessary conservation actions. In this regard, a revised boundary for the Gando Protected Area was proposed based on the results of modeling including: climatic refuges,

population critical areas, historical species distribution, crocodile/human conflict, and consideration of watershed boundaries.

The permanent plots were also located for monitoring the population of the marsh crocodile. Additionally, spatial prioritization for feasibility studies on the species' assisted migration to new habitats was conducted in the southern Balochestan watershed—the primary distribution area of the species—and in the adjacent watershed (Bandar Abbas–Sedij). Projected areas of human/crocodile conflict by 2070 were also identified.

Conclusion

The present study was conducted to investigate the possibility of protecting the marsh crocodile in the Gando Protected Area, and showed that in addition to the Gando Protected Area, which is the main habitat of the species, the existing network of protected areas will not be effective in supporting the survival of the species in the future. Maintaining the current habitat configuration or defining a restoration zone within climatically unsuitable portions of the protected area will not be feasible, as these areas are projected to become unsuitable under future climate scenarios. Given the high probability of habitat suitability shifts, assisted migration will be inevitable for the survival of the species.

The ability of the marsh crocodile to move according to climate change will increase the human/crocodile conflicts, and therefore, the migration path of the species should be consciously paved through assisted migration.

Accordingly, based on the modeling conducted, critical population areas and climatic refuges for the species were located to show the human/crocodile conflicts, propose a revised boundary for the Gando Protected Area, population monitoring plots for this species, and prioritize target sites for local and field-based feasibility studies supporting the implementation of assisted migration actions.

Acknowledgements

This article is an excerpt from the project with contract number 1402/600/55755, dated February 27, 2024 (1402/12/8 SH), funded by Department of Environment. The authors wish their full appreciation and sincere gratitude to all the respected officials and esteemed experts from the headquarters in and provinces who participated in the advancement of this project. The authors report administrative and non-financial support was provided by the University of Zabol, Office of Research, by grant number IR-UOZ-GR-4956.

جلد ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، ص ۲۷۲-۲۵۱ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.94244.1592 دسترسی آزاد

مهاجرت کمکی و اصلاح مرز مناطق حفاظت شده به عنوان استراتژی‌های سازگاری با اقلیم جهت حمایت از بقاء خزندگان TSD

(درس‌هایی از *Crocodylus Palustris*)

ملیحه عرفانی [۱*]، عبدالرسول سلمان ماهینی [۲]

[۱*] گروه محیط زیست، دانشکدۀ منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

[۲] گروه محیط زیست، دانشکدۀ شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچۀ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۳

کلمات کلیدی:

تغییرات اقلیمی

تعیین جنسیت وابسته به دما (TSD)

مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه

مهاجرت کمکی

پناهگاه اقلیمی

تعارض تمساح/ انسان

چکیده

تغییرات اقلیمی تأثیرات شدیدی بر اکوسیستم‌های آبی و گونه‌های وابسته، به‌ویژه خزندگان با تعیین جنسیت وابسته به دما (TSD) خواهد داشت. مطالعۀ حاضر با هدف بررسی امکان مهاجرت کمکی و اصلاح مرز مناطق حفاظت شده جهت حمایت از بقاء گونه تمساح مردابی (*Crocodylus palustris* Lesson, 1831) تحت تأثیر تغییرات اقلیم انجام شد. به این منظور تغییرات گستره مطلوب زیستگاه گونه تحت سناریوهای تغییر اقلیم تا سال ۲۰۷۰ جهت شناسایی پناهگاه‌های اقلیمی پیش‌بینی شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که بخشی از منطقۀ حفاظت شده گاندو در سناریوی RCP2.6 و تمام آن در سایر سناریوها در خارج از محدودۀ مطلوب زیستگاهی قرار خواهد گرفت. همچنین سایر مناطق حفاظت شده نیز در محدوده‌های مطلوب زیستگاهی قرار نخواهند داشت. بنابراین با اتکا به مدیریت مناطق حفاظت شده نمی‌توان به حفاظت از این گونه پرداخت. از این رو اقدامات مدیریتی جهت مهاجرت کمکی این گونه ضروری است. در این رابطه مرز اصلاحی پیشنهادی برای منطقۀ حفاظت شده گاندو بر اساس نتایج به دست آمده شامل: پناهگاه‌های اقلیمی، مناطق بحرانی جمعیت و مناطق با تعارض تمساح/ انسان و توجه به مرزهای طبیعی زیرحوزه‌های آبخیز پیشنهاد گردید. همچنین پلات‌های دائمی جهت پایش جمعیت تمساح مردابی و اولویت‌بندی انجام مطالعات امکان‌سنجی انتقال گونه به زیستگاه‌های جدید نیز نقشه‌سازی شد.

* نویسندۀ مسئول: ملیحه عرفانی

Email: maliheerfani@uoz.ac.ir

مقدمه

تغییر اقلیم در چند دهۀ اخیر موجب بروز تأثیراتی عمیق بر روی تنوع زیستی شده است، از آن‌جمله می‌توان به تغییر در رفتار، فنولوژی (تنظیم چرخه زیستی متناسب با فصول) و زمان تولید مثل، تغییر زمان مهاجرت گونه‌های جانوری، طول دورۀ رشد، پراکنش، اندازه و بقای جمعیت‌ها، زیرجمعیت‌ها و گونه‌ها و فراوانی آفات و بیماری‌ها اشاره کرد (Newbold, Oppenheimer, Etard & Williams, 2020).

علاوه بر این، تغییرات اقلیمی الگوهای توزیع گونه‌ها را مختل کرده، مانع اتصال بین زیستگاه‌های آنها شده و در نتیجه باعث ناپدید شدن کریدورهای بوم‌شناختی و جلوگیری از مهاجرت گونه‌ها می‌شود. بر اساس برآوردهای انجام شده در صورتی که دمای جهانی از ۱.۵ درجه سانتیگراد فراتر رود، انقراض‌ها به سرعت تسریع می‌شوند (Urban, 2024). افزایش دما، تغییر در الگوهای بارش، وقایع اقلیمی شدید نظیر طوفان و باران‌های سنگین و دماهای بالای ثبت شده از دیگر جنبه‌هایی هستند که گونه‌ها، جامعه‌ها و زیست‌بوم‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. علاوه بر موارد ذکر شده، تغییر اقلیم می‌تواند منجر به تغییرات شدید در تالاب‌ها و رژیم هیدرولوژیک آنها شود. بیشتر فرایندهای تالاب به شکل پیچیده و ظریفی وابسته به هیدرولوژی حوضۀ آبریز یا آب‌های ساحلی هستند که این می‌تواند تنوع زیستی و پدیده‌های مرتبط با گونه‌های تالابی را تحت تأثیر قرار دهد (Benateau, Gaudard, Stamm & Altermatt, 2019). ادامۀ روند تأثیرات تغییرات اقلیمی موجب انقراض گونه‌های در معرض تهدید و تخریب بیشتر زیستگاه‌های آنها نیز خواهد شد. ضمن اینکه توجه به این نکته بسیار ضروری است که در گونه‌هایی که دارای ویژگی تعیین جنسیت نوزاد توسط دما (TSD) هستند، نظیر تمساح‌ها و لاک‌پشت‌ها، تغییر دما منجر به تغییر جنسیت نوزادان و در نتیجه تغییر در ساختار و ترکیب جمعیت در طول نسل‌های آتی خواهد شد (Foden et al., 2016; Bock et al., 2020).

پراکنش گونه‌ها تحت تأثیر عوامل مختلف محیطی به صورت سلسله مراتبی از مقیاس‌های کلان و منطقه‌ای تا محلی قرار دارند. علاوه بر این، تغییرپذیری این عوامل نیز در طیفی از سطوح منطقه‌ای تا محلی متغیر است. متغیرهای اقلیمی از جمله متغیرهای مؤثر در مقیاس منطقه‌ای هستند که قبل از سایر فاکتورها بر پراکنش گونه‌ها مؤثرند (Erfani & Salmanmahiny, 2025). اهمیت این متغیرها خصوصاً برای گونه‌های کلیدی خونسردی چون تمساح مردابی (*Crocodylus palustris Lesson*, 1831) که زیستگاه آن مناطق تالابی آب شیرین بوده و نسبت جنسی نوزادان آن تحت تأثیر دمای محیط انکوباسیون قرار دارد دوچندان است (Grigg & Kirshner, 2015) . تمساح مردابی به عنوان یک گونه در معرض تهدید و ثبت شده در طبقۀ آسیب‌پذیر در لیست سرخ IUCN نیز مورد توجه است که از بین رفتن زیستگاه در اثر تغییرات فصلی و سالانه مناطق تالابی از مهم‌ترین عوامل تهدید آن ذکر شده است (Chang et al., 2015; Heydari et al., 2022) و بنابراین اثرات تغییرات اقلیمی بر بقاء این گونه قابل توجه خواهد بود.

مناطق حفاظت شده پایه و اساس رویکردهای حفاظتی مدرن هستند. اهمیت آنها در حفاظت از تنوع زیستی در سراسر جهان نشان داده شده است و اجماع علمی واضحی وجود دارد که گسترش شبکه مناطق حفاظت شده برای حفظ و احیای اکوسیستم‌های طبیعی دست نخورده، حفاظت از تنوع زیستی، حمایت از خدمات اکوسیستم و دستیابی به راه‌حل‌های آب و هوایی طبیعی، حیاتی است (Dobrowski et al., 2021). در صورتی‌که تغییرات بوم‌شناختی در بخش‌هایی از مناطق حفاظت شده تحت تأثیر مداخلات مستقیم و غیرمستقیم انسانی رخ داده باشد، این مناطق در قالب زون بازسازی قرار گرفته و تلاش‌های مدیریتی معطوف به بازسازی این مناطق جهت احیاء کارکردهای بوم‌شناختی آن خواهد بود (Xie, Zhu, Bai, He & Zhang, 2024). جهت حمایت از زیست گونه‌های وحشی، تعریف، تغییر و اصلاح مرز مناطق حفاظت شده اگر چه امکان پذیر بوده، اما بسیار چالش برانگیز است، چرا که عمدۀ مناطق تحت تأثیر مداخلات انسانی ارزش‌های زیستگاهی خود را از دست داده و یا تحت کاربری‌های دیگر اداره و مدیریت می‌شوند (Ducros et al., 2023; Bao & Yang, 2024) و بنابراین احیاء بخش‌های آسیب دیده در محدوده مرزهای مناطق حفاظت شده در قالب زون بازسازی امکان‌پذیرترین مسیر جهت حفاظت از گونه‌ها است.

در مواجهه با تغییرات اقلیمی، گونه‌های جانوری و گیاهی با سه گزینه اساسی روبه‌رو هستند: سازگاری با شرایط جدید، مهاجرت به زیستگاه‌های مناسب‌تر و یا رویارویی با خطر انقراض (Xu & Prescott, 2024) . نگرانی‌های فزاینده مبنی بر ناکارآمدی روش‌های سنتی حفاظت، مانند ایجاد مناطق حفاظت‌شده، در تأمین امنیت بلندمدت گونه‌ها در برابر تغییرات آب‌وهوایی، موجب ظهور راهبردهای نوین حفاظتی شده است. یکی از این راهکارهای پیشگیرانهٔ جدید، مهاجرت کمکی است که انتقال عمدی گونه‌ها به مناطق جغرافیایی جدید را با توجه به پیش‌بینی‌های تغییر اقلیم در برمی‌گیرد. مهاجرت کمکی، شکلی از جابه‌جایی حفاظتی است که در آن گونه‌ها از محدودهٔ بومی خود به مناطقی منتقل می‌شوند که پیش‌بینی می‌شود تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، زیستگاه‌های مطلوبی برای آن‌ها فراهم می‌شود. این اقدام زمانی ضرورت می‌یابد که گونه‌ها به دلیل موانع طبیعی، جغرافیایی، یا محدودیت‌های زمانی قادر به پراکنش طبیعی و رسیدن به این مناطق نباشند (Hällfors et al., 2016). این رویکرد حفاظتی، اگرچه امیدوارکننده و ضروری است، اما پیچیدگی‌های بوم‌شناختی و اخلاقی خاص خود را دارد که نیازمند بررسی‌های دقیق علمی است.

امروزه توجه به مدل‌سازی توزیع گونه‌ها (SDM) در بررسی‌های زیست‌شناسی حفاظت و بوم‌شناختی رو به افزایش است. این گونه مدل‌سازی‌ها در تلاش هستند تا به سؤال‌های جغرافیای زیستی و تکاملی، نمایه‌های زیست‌شناختی، اثر گرمایش جهانی و تغییر اقلیم در توزیع گونه‌ها و گسترش تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و حفاظتی از جمله مهاجرت کمکی پاسخ دهند (Vasconcelos et al., 2024). با این وجود مطالعات انجام شده بر روی مطلوبیت زیستگاه تمساح مردابی در ایران و برخی از کشورها شامل مطالعات اندکی است که در آنها اصلاح مرز شبکهٔ مناطق حفاظت شده و امکان‌سنجی مهاجرت کمکی، گونه بررسی نشده است. در مطالعه انجام شده توسط مبارکی و همکاران (Mobaraki, Erfani, Abtin & Ataie, 2018) مطلوبیت زیستگاه تمساح مردابی توسط عوامل مختلفی چون فاکتورهای محیط‌زیستی شامل ارتفاع، شاخص پوشش‌گیاهی NDVI، دما، بارندگی، فاصله از سکونتگاه‌های شهری، سکونتگاه‌های روستایی، جاده و رودخانه‌ها به روش MaxEnt مدل‌سازی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که مهم‌ترین متغیرهای زیستگاهی، فاصله از رودخانه، دما و ارتفاع از سطح دریا بوده و بخش عمدهٔ منطقهٔ مطلوب زیستگاهی با مساحت۳۱۲ کیلومتر مربع در خارج از منطقهٔ حفاظت شده گاندو قرار دارد. شفیعی زاده و همکاران (Shafiezade, Moradi, Fakheran & Pourmanafi, 2018) نیز مطلوبیت زیستگاه تمساح مردابی را در کنار چند گونهٔ دیگر ارزیابی کردند. آنها نشان دادند که تنها ۱۵ درصد از زیستگاه‌های حساس تحت پوشش مناطق حفاظت شده هستند. حیدری و همکاران (Heydari et al., 2022) در ۴۳ ایستگاه مطالعاتی در حوزه پراکنش تمساح مردابی نشان دادند که جمعیت این گونه در سال‌های مختلف دارای نوساناتی بوده و بسیار تحت تأثیر شرایط خشکسالی قرار دارد. در مطالعهٔ انجام شده توسط مبارکی و همکاران نیز نشان داده شد که مناطق مطلوب زیستگاهی تمساح مردابی در جهان تحت تأثیر تغییرات اقلیمی در آینده تکه‌تکه‌تر و به مناطق درون خشکی کشیده خواهد شد. آنها ایران و شمال هند را به عنوان مهم‌ترین نواحی پراکنش این گونه در آینده معرفی کردند (Mobaraki et al., 2023). عرفانی و سلمان ماهینی (Erfani & Salmanmahiny, 2025) در مطالعهٔ خود وضعیت مطلوبیت تاریخی زیستگاه تمساح مردابی را با روش حداکثر بی‌نظمی و داده‌های زیست‌اقلیم استخراج شده از دیتا بانک مدل KGClim_V1 انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که مناطق مطلوب زیستگاهی در مناطق کم بارش قرار دارند و مؤثرترین متغیرهای اقلیمی نیز میانگین دمای سالانه، بارندگی مرطوب‌ترین ماه سال و بارندگی گرم‌ترین ماه در نیمه سرد سال است. مطالعاتی نیز در کشورهای مختلف بر روی سایر گونه‌های تمساح با استفاده از داده‌های زیست‌اقلیم انجام شده است که می‌توان به مطالعات رودر و همکاران (Rödder, Engler, Bonke, Weinsheimer & Pertel, 2010)، ایهلو و همکاران (Ihlow et al., 2014) و عابدین و همکاران (Abedin et al., 2025) اشاره نمود.

مطالعات انجام شده بر روی سایر گونه‌های دارای خصوصیت TSD نیز بر افزایش خطر انقراض گونه‌ها به دلیل تغییرات اقلیمی و نیاز فوری به کاهش اثرات تخریب زیستگاه و فعالیت‌های انسانی بر توزیع بالقوه آنها در آینده تأکید دارد. این موضوع بر روی ۵۲۸۲ گونه خزنده در مقیاس جهانی (Li, Shao, Jiang, Yan & Liao, 2024)، ۳۰ گونه خزنده و دوزیست بومی بیابان در ایالات متحده و مکزیک (Sinervo et al., 2024)، ۱۶ گونه خزنده در مراکش (Elbahi et al., 2024) و ده گونه سوسمار از جنس *Diploderma* (Xiao et al., 2025) به اثبات رسیده است.

مکان‌یابی تغییرات زیستگاه‌های مطلوب گونه‌های حساس به تغییرات اقلیم در آینده می‌تواند در مدیریت و حفاظت آنها از جمله دانستن وضعیت مطلوبیت زیستگاه‌ها، چگونگی افزایش یا کاهش مطلوبیت آنها و معرفی گونه به زیستگاه‌های جدید مؤثر باشد. همچنین بررسی کفایت مناطق حفاظت شده و امکان تعریف زون بازسازی جهت حفاظت از گونه‌ها نیز با مدل‌سازی‌های مطلوبیت زیستگاه تحت سناریوهای مختلف اقلیمی آشکار خواهد شد. با توجه به پیشینهٔ ارائه شده و عدم وجود مطالعات مشابه، پژوهش حاضر با هدف بررسی امکان مهاجرت کمکی و اصلاح مرز مناطق حفاظت شده جهت حمایت از بقاء گونه تمساح مردابی تحت تأثیر تغییرات اقلیم انجام شد.

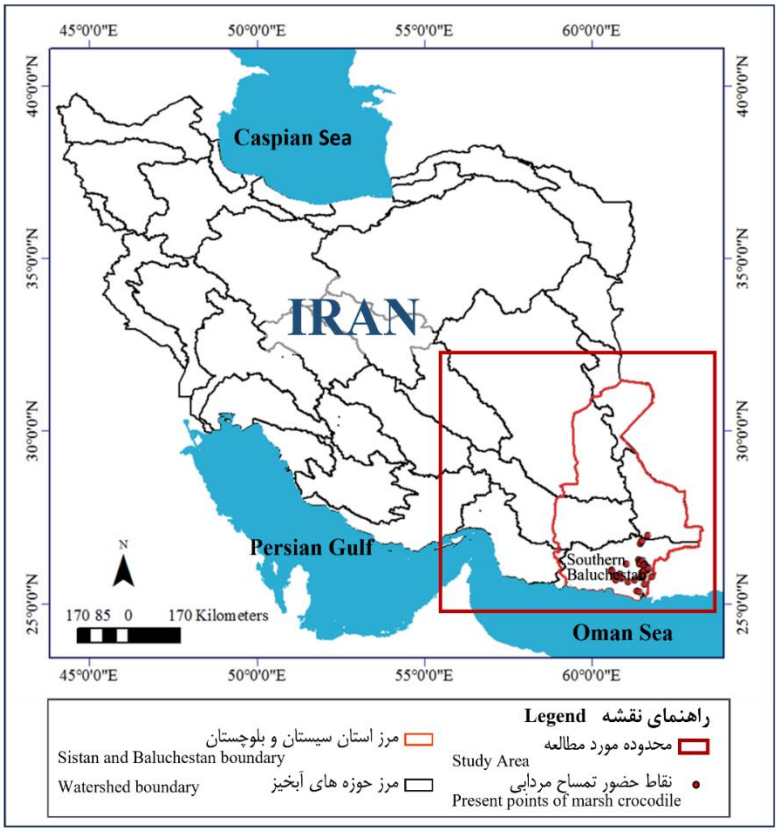
منطقهٔ مورد مطالعه و نقاط حضور تمساح مردابی

جنوب‌شرقی ایران به‌عنوان منطقهٔ مورد مطالعه، انتخاب شد که شمال‌غربی‌ترین گستره پراکنش جهانی تمساح مردابی را در برمی‌گیرد. از آنجا که هدف مطالعه با بررسی تغییرات مطلوبیت زیستگاه، تحت تأثیر تغییر اقلیم قابل حصول است، محدودهٔ مورد بررسی فراتر از گستره پراکنش فعلی در نظر گرفته شد تا تغییرات بالقوه در مناطق وسیع‌تری تحلیل شود. به این منظور، محدوده‌ای با مختصات ۲۵ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۳۳ دقیقه عرض شمالی و ۵۵ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۶۴ درجه و ۵ دقیقه طول شرقی به‌عنوان منطقهٔ مورد مطالعه در نظر گرفته شد (شکل ۱). این گونه عمدتاً در ناحیهٔ مکران، در جنوب استان سیستان و بلوچستان، در حوزه شهرستان‌های چابهار، راسک و دشتیاری و به‌ویژه در امتداد رودخانه‌های باهوکلات (سرباز) و کاجو پراکنش دارد. زیستگاه اصلی آن در حوزه آبخیز رودخانه باهوکلات، مشتمل بر رودخانه‌های فرعی، برکه‌ها و سدها، واقع شده است (بین عرض‌های ۲۵°۱۰' تا ۲۷° شمالی و طول‌های ۶۰°۲۰' تا ۶۱°۵۰' شرقی). مهم‌ترین زیستگاه‌ها شامل رودخانه‌های سرباز، باهوکلات، نهنگ، کاجو، سیرین کور، و برکه‌هایی مانند کلانی، احمدآباد، فیروزآباد، آزادی و دریاچه سد پیشین هستند (Abtin & Mobaraki, 2016). بخشی از پراکنش این گونه در منطقه حفاظت‌شده گاندو با وسعت ۳۸۲۵ کیلومتر مربع قرار دارد. با توجه به وابستگی شدید این گونه به منابع آبی، پراکنش آن در فصول پرآب افزایش می‌یابد.

مواد و روش‌ها

مطالعهٔ حاضر با هدف بررسی امکان مهاجرت کمکی و اصلاح مرز مناطق حفاظت شده جهت حمایت از بقاء گونه تمساح مردابی تحت تأثیر تغییرات اقلیم انجام شد. به این منظور در ابتدا مناطق بحرانی جمعیت در اثر تغییر اقلیم پیش‌بینی و در ادامه تعارض تمساح مردابی/ انسان در سال ۲۰۷۰ نقشه‌سازی شد تا بر اساس این نتایج در خصوص امکان‌سنجی مهاجرت کمکی و اصلاح مرز مناطق حفاظت شده بتوان اظهار نظر کرد. جهت تعیین مناطق بحرانی جمعیت در اثر تغییر اقلیم از مدل‌سازی مکسنت با کمک داده‌های حضور گونه و زیست‌اقلیم‌ها استفاده شد. شکل ۱ پراکنش نقاط حضور گونه و حوزه‌های آبخیز اصلی را نشان می‌دهد.

نقاط حضور این گونه به عنوان متغیر وابسته جهت هماهنگی با متغیرهای مستقل یعنی متغیرهای زیست‌اقلیم (میانگین بلندمدت داده‌های اقلیمی) در فاصله بین سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۳ با مرور منابع و بازدیدهای میدانی به دست آمد (Mobaraki et al., 2018; Erfani & Salmanmahiny, 2025). به این ترتیب امکان ثبت مناطق مطلوب که تحت تأثیر فاکتورهای محلی در برخی از سال‌ها امکان حضور گونه را نداشتند نیز مهیا و تا حد زیادی از مطلوبیت نقاط حضور از نظر فاکتورهای کلان اقلیمی اطمینان حاصل شد.



شکل ۱- موقعیت پراکنش نقاط حضور تمساح مردابی در محدودهٔ مورد مطالعه و حوزه‌های آبخیز

Fig.1. Location of distribution of marsh crocodile presence points in the study area

انتخاب پایگاه داده‌های زیست‌اقلیم مناسب از نظر مقیاس مکانی و زمانی

زیست‌اقلیم به عنوان پیش‌بینی‌کننده‌های اصلی در مدل‌سازی آشیان بوم‌شناختی به کار می‌روند. آنها شاخص‌هایی هستند که رابطهٔ یکپارچه بین موجودات زنده و آب و هوا را منعکس می‌کنند (Merkenschlager, Bangelesa, Paeth & Hertig, 2023).

متغیرهای مستقل در این پژوهش فاکتورهای زیست‌اقلیمی بوده که این داده‌ها میانگین بلندمدت داده‌های اقلیمی هستند. دیتا بانک‌های مختلفی برای فاکتورهای زیست‌اقلیمی با پوشش، درجه تفکیک و تعداد متغیرهای متفاوت وجود دارند. تعداد فاکتورهای زیست‌اقلیمی در این دیتا بانک‌ها بین ۹ (Booth, 2022) تا ۱۹ (Fick & Hijmans, 2017) متغیر است. با مقایسهٔ دیتا بانک‌های مختلف، بهترین آنها به لحاظ به روز بودن و دقت و صحت مکانی انتخاب گردید. بر اساس بررسی صورت گرفته بالاترین دقت مکانی داده‌های زیست‌اقلیمی جهانی با درجهٔ تفکیک مکانی یک کیلومتر مربع بوده که مورد توجه این مطالعه قرار گرفت. این دیتا بانک‌ها شامل WorldClim (Fick & Hijmans, 2017)، KGClim (Cui, Liang, Wang & Liu, 2021) و CHELSA (Karger et al., 2021) است که از نظر میزان صحت مکانی و ارائه جزئیات جهت تطابق با واقعیت زمینی مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به اینکه در توسعه دیتا بانک KGClim_V1 از بسیاری از داده‌های سایر دیتا بانک‌ها مانند WorldClim V2، CHELSA V1.2، CRU TS v4.03، UDEL، GPCC و برای پیش‌بینی‌های آینده از داده‌های زیرمقیاس‌سازی شده و از نظر اریبی اصلاح گردیده سی مدل جهانی اقلیم CMIP5 از پایگاه داده CCAFS استفاده شده است، رویکرد ترکیبی و روش‌های تصحیح اریبی به کار رفته در تولید این دیتا بانک منجر به کاهش عدم قطعیت‌ها و بهبود دقت طبقه‌بندی آب و هوا شده است. از این رو این مجموعه داده، دقیق‌تر و با جزئیات بیشتری نسبت به سایر دیتا بانک‌ها بوده و توانایی ضبط دقیق تغییرات اخیر و پیش‌بینی شده را دارد. همچنین نقشه‌های متغیرهای

ارائه شده این دیتا بانک یک تصویر جامع از شرایط آب و هوایی ریز مقیاس‌سازی شده فراهم می‌آورد که بر اساس پوشش مداوم طولانی مدت ویژگی‌های اقلیمی به دست آمده و ضمن اینکه تصویر دقیقی بر اساس ویژگی‌های توپوگرافی ارائه می‌دهد با توزیع پوشش گیاهی نیز کاملاً منطبق است. از مزایای دیگر این دیتا بانک پوشش جامع آن است. این مجموعه داده شامل ده دورهٔ تاریخی از سال ۱۹۷۹-۲۰۱۷ و چهار دورهٔ آینده از ۲۰۲۰-۲۰۹۹ تحت چهار سناریوی اقلیمی مسیرهای نماینده‌ی غلظت گازهای گلخانه‌ای[1] RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5 است که پوشش زمانی مداوم طولانی مدت را فراهم می‌کند. همچنین شامل ۱۲ متغیر زیست‌اقلیم با وضوح ۱ کیلومتر است که توضیحات مفصلی از میانگین سالانه، فصلی بودن و شرایط استرس‌زای آب و هوایی را ارائه می‌دهدکه شامل میانگین دمای سالانه، دمای گرم‌ترین ماه، دمای سردترین ماه، بارندگی سالانه، بارندگی گرم‌ترین نیمه سال، بارندگی نیمهٔ سرد سال، بارندگی ماه خشک، بارندگی خشک‌ترین ماه در نیمه گرم سال، بارندگی خشک‌ترین ماه در نیمه سرد سال، بارندگی مرطوب‌ترین ماه، بارندگی مرطوب‌ترین ماه در نیمه خشک سال و بارندگی گرم‌ترین ماه در نیمه سرد سال است (Cui et al., 2021). لازم به ذکر است که با توجه به اینکه جهت مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه، بین متغیرهای مستقل نباید همبستگی وجود داشته باشد (Lambert & Virgili, 2023) و اینکه در مطالعات قبلی غربالگری داده‌های زیست‌اقلیمی بر اساس میزان همبستگی بین آنها و میزان تنوع درون هر داده انجام شده است (Erfani & Salmanmahiny, 2025)، از هفت زیست‌اقلیم میانگین دمای سالانه، دمای گرم‌ترین ماه، بارندگی سالانه، بارندگی گرم‌ترین نیمه سال، بارندگی خشک‌ترین ماه در نیمه سرد سال، بارندگی مرطوب‌ترین ماه و بارندگی گرم‌ترین ماه در نیمه سرد سال در مطالعهٔ حاضر استفاده شد.

پیش‌بینی مناطق بحرانی جمعیت و آشکارسازی تعارض تمساح مردابی/ انسان در سال ۲۰۷۰

جهت پیش‌بینی مناطق بحرانی جمعیت و آشکارسازی تعارض تمساح مردابی/ انسان در ابتدا مدل‌سازی حداکثر بی‌نظمی (MaxEnt) با کمک نرم‌افزار Maxent version 3.4.4 (Phillips, Dudík & Schapire, 2024) انجام شد. با استفاده از داده‌های حضور گونه به عنوان متغیر وابسته و متغیرهای زیست‌اقلیمی به عنوان مستقل مدل مکسنت با ۱۵ بار تکرار اجرا شد تا بر اساس میانگین تکرارهای انجام شده، مناطق بالقوه مطلوب برای گونه در زمان حال، بر روی لایه‌های پیش‌بینی‌کننده اقلیم مدل KGClim_V1 سال ۲۰۷۰ پروجکت شود. در این مرحله جهت پیش‌بینی تغییرات مطلوبیت زیستگاه بالقوه از داده‌های اقلیمی پیش‌بینی شده تحت چهار سناریوی اقلیمی آینده RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5 برای سال ۲۰۷۰ استفاده شد.

تنظیمات نرم‌افزار نیز مطابق با مطالعه عرفانی و سلمان ماهینی (Erfani & Salmanmahiny, 2025) انجام شد. بر این اساس مدل‌سازی با ۱۰۰۰ تکرار انجام شد و ۱۰۰۰۰ نقطهٔ تصادفی پس‌زمینه به عنوان نقاط عدم حضور جهت محاسبه خطای ارتکاب انتخاب شد. نمونه‌گیری مجدد با ۱۵ تکرار بر اساس روش ارزیابی متقابل انجام شد و خروجی‌های مدل با فرمت Cloglog تهیه گردید. عملکرد مدل حداکثر آنتروپی با معیارهای کمی مساحت زیر منحنی (AUC[2]) مورد سنجش قرار گرفت. به طور کلی AUC ۰/۷ تا ۰/۸ مدل خوب، ۰/۸ تا ۰/۹ عالی و بیشتر از ۰/۹ پیش‌بینی بسیار عالی را نشان می‌دهد (Giovanelli, Siqueira, Haddad & Alexandrino, 2010).

پس از تهیه لایه‌های پیوسته مطلوبیت زیستگاه، از آستانه آموزش حداکثر حساسیت به‌علاوه ویژگی (MTSS) برای تهیه لایه‌های بولین نشان دهنده طبقات مطلوب و نامطلوب زیستگاهی استفاده شد. انتخاب MTSS به‌عنوان آستانه تولید لایه‌های بولین به دلیل به حداقل رساندن خطای پیش‌بینی بیش از حد[3] و خطای حذف واقعی[4] بود (El-Khalafy, El-Kenany, Al-Mokadem, Shaltout & Mahmoud, 2025).

1- Representative Concentration Pathway
2- Area Under the Curve
3- Commission (False Positive)
4- Omission (False Negative)

لایه‌های بولین مطلوبیت زیستگاه به دست آمده با داده‌های اقلیمی بلند مدت (وضعیت تاریخی مطلوبیت) با مطلوبیت زیستگاه گونه‌ها در آینده (نتایج سناریوهای مختلف تغییر اقلیم) مقایسه شد تا تغییرات مطلوبیت زیستگاه تمساح مردابی تا سال ۲۰۷۰ آشکار شود و مناطق مشترک مطلوب تاریخی و آینده به عنوان پناهگاه‌های اقلیمی معرفی گردند.

در ادامه، مناطق بحرانی جمعیت نیز بر اساس تغییرات مطلوبیت زیستگاه نقشه‌سازی شد. به این منظور با توجه به لایه‌های بولین حال و آینده مطلوبیت زیستگاه، مناطق بدون ریسک (مطلوب در زمان حال و چهارسناریوی تغییر اقلیم) تا ریسک بالا (مطلوب در زمان حال و یکی از سناریوهای اقلیمی) پهنه‌بندی شدند. مناطق بدون ریسک در واقع پناهگاه‌های اقلیمی را نمایندگی می‌کنند و در اصلاح مرز مناطق حفاظت شده و امکان معرفی گونه به زیستگاه‌های جدید از طریق مهاجرت کمکی می‌توانند به کار روند (Sinervo et al., 2024).

با توجه به اینکه تلاقی سکونتگاه‌ها (شهرها و روستاها) با شبکهٔ جاده‌ها و مناطق مطلوب زیستگاهی دارای بالاترین ریسک ایجاد تعارض تمساح/ انسان است (Mobaraki, 2015)، لایه‌های این مناطق با لایهٔ بولین مناطق مطلوب زیستگاهی حال و آینده (بخش مشترک بین چهار سناریوی اقلیمی) روی هم‌گذاری شد تا مناطق با تراکم بالای سکونتگاه و جاده در محدوده‌های مشترک مطلوب زیستگاهی به عنوان پرتعارض‌ترین مناطق شناسایی شوند.

روش بررسی کفایت شبکه مناطق حفاظت شده در حمایت از بقا تمساح مردابی

روی هم‌گذاری لایه‌های بولین تغییرات احتمالی مطلوبیت زیستگاه در اثر تغییرات اقلیم با مناطق حفاظت شده، نقش شبکه مناطق حفاظت شده را در حمایت از بقاء گونه‌ها نشان می‌دهد (Elbahi et al., 2024). از این رو روی هم‌گذاری لایه‌های بولین مذکور با لایهٔ منطقه حفاظت شده گاندو به عنوان زیستگاه اصلی گونه، امکان حفاظت از گونه در آینده را با تعریف زون بازسازی یا اصلاح مرز مناطق حفاظت شده آشکار ساخت. همچنین شبکه مناطق حفاظت شده نیز در پشتیبانی از حیات گونه در آینده بررسی گردید.

روش‌های به کار رفته جهت امکان‌سنجی اصلاح مرز منطقه حفاظت شده گاندو و مهاجرت کمکی

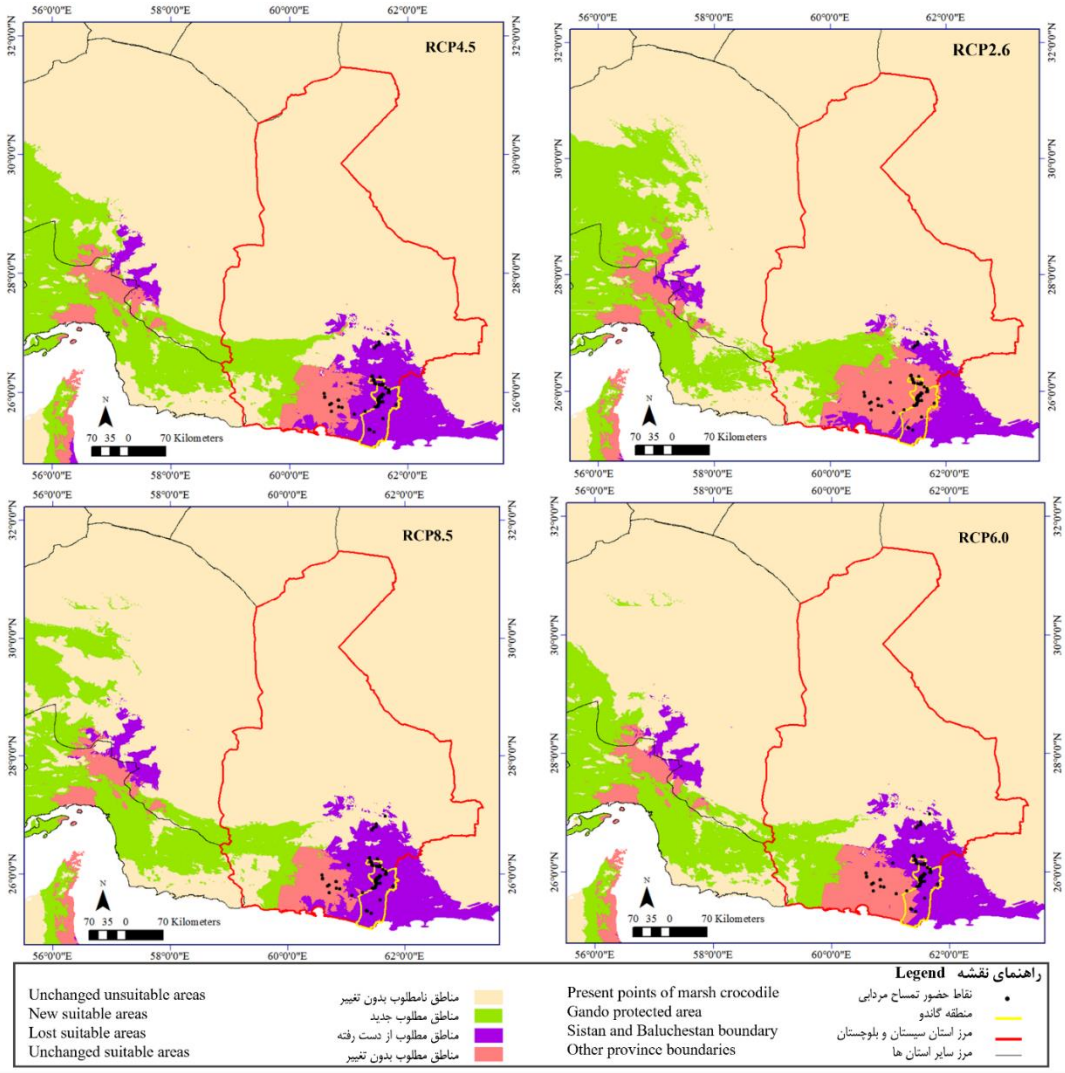
در این مرحله مرز اصلاحی پیشنهادی منطقهٔ حفاظت شده گاندو بر اساس نتایج به دست آمده و توجه به مرزهای حوزه‌های آبخیز پیشنهاد گردید. همچنین پلات‌های دائمی پایش جمعیت گونه نیز در این محدوده با توجه به نتایج مدل‌سازی‌ها و امکان حضور گونه شناسایی شد. در نهایت اولویت‌بندی مناطق جهت انجام مطالعات محلی مهاجرت کمکی گونه در حوزه آبخیز اصلی پراکنش گونه و حوزهٔ مجاور آن نیز شناسایی شد.

نتایج و بحث

پیش‌بینی تغییرات مساحت مناطق مطلوب زیستگاهی تمساح مردابی در آینده

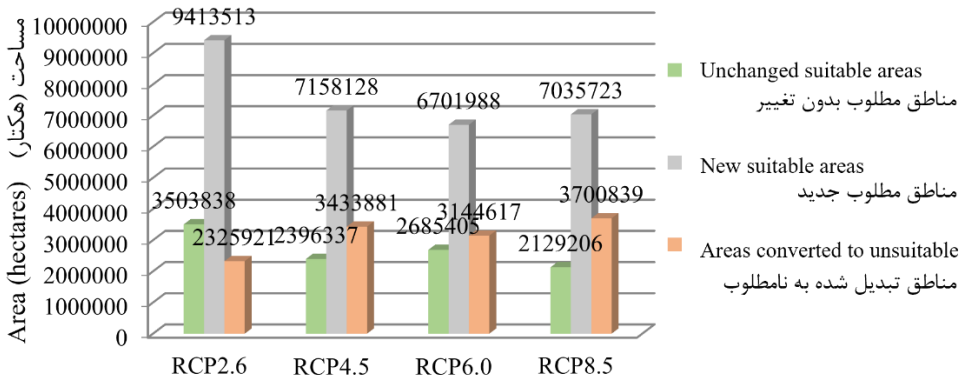
میانگین آماره AUC به‌دست آمده از اجرای مدل، کیفیت عالی و قابلیت پیش‌بینی بالای مدل در شناسایی مناطق مطلوب زیستگاهی را نشان داد (Mean: 0.98, SD: 0.012). بر اساس میانگین آستانه MTSS در ۱۵ بار تکرار مدل که عدد ۰/۰۳۱۹ به دست آمد، نقشه مطلوبیت زیستگاه به دو طبقه مطلوب و نامطلوب تفکیک و لایه بولین طبقه‌بندی شده برای شرایط تاریخی و آینده (۲۰۷۰) تحت سناریوهای مختلف به دست آمد. بر این اساس تغییرات مطلوبیت زیستگاه آشکار شد. شکل ۲ نتایج تغییرات مطلوبیت زیستگاه را برای چهار سناریوی اقلیمی آینده RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5 تا سال ۲۰۷۰ نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، در تمام سناریوها افزایش وسعت منطقهٔ مطلوب بر اساس تغییر زیست‌اقلیم‌ها در سال ۲۰۷۰ دیده می‌شود که این گسترش عمدتاً رو به غرب و کمی نیز به سمت شمال است. همچنین بیشترین مناطق مطلوبی که به نامطلوب تبدیل خواهند شد در قسمت‌های شرقی و جنوبی است که شدت این تغییرات از سناریوی RCP2.6 به RCP8.5 شدیدتر خواهد بود به نحوی که در بدترین سناریو یعنی سناریوی RCP8.5 عمدهٔ مناطق حضور گونه در حال حاضر در مناطق نامطلوب قرار خواهند گرفت. همچنین از سناریوی RCP4.5 به RCP8.5 عملاً منطقه حفاظت شده گاندو در خارج از محدودهٔ مطلوب زیستگاهی واقع خواهد شد. شکل ۳ نیز میزان

این تغییرات را نشان می‌دهد که در آن سیر افزایشی تبدیل مناطق مطلوب به نامطلوب از ۳/۹ درصد تا ۶/۲۸ درصد مشهود است. مساحت مناطق مطلوب تاریخی ثابت در دورهٔ مورد مطالعه در سناریوی ۲.۶، ۳۵۰۳۸۳۸ و در سناریوهای ۴.۵، ۶ و ۸.۵، بیشتر بوده و به ترتیب به ۲۳۹۶۳۳۷، ۲۶۸۵۴۰۵ و ۲۱۲۹۲۰۶ هکتار می‌رسد که به ترتیب ۵/۸۸، ۴/۰۲، ۴/۵۱ و ۳/۵۷ درصد است. همچنین مناطق نامطلوب تاریخی که به مطلوب تا سال ۲۰۷۰ تبدیل می‌شوند در سناریوی های ۲.۶، ۴.۵، ۶ و ۸.۵ به ترتیب برابر با ۹۴۱۳۵۱۳، ۷۱۵۸۱۲۸، ۶۷۰۱۹۸۸ و ۷۰۳۵۷۲۳ هکتار است که به ترتیب برابر با ۱۵/۸، ۱۲/۰۲، ۱۱/۲۵ و ۱۱/۸۱ درصد است.



شکل ۲- تغییرات گسترهٔ مطلوبیت زیستگاه بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم

Fig.2. Changes in the extent of habitat suitability based on the climatic change scenarios

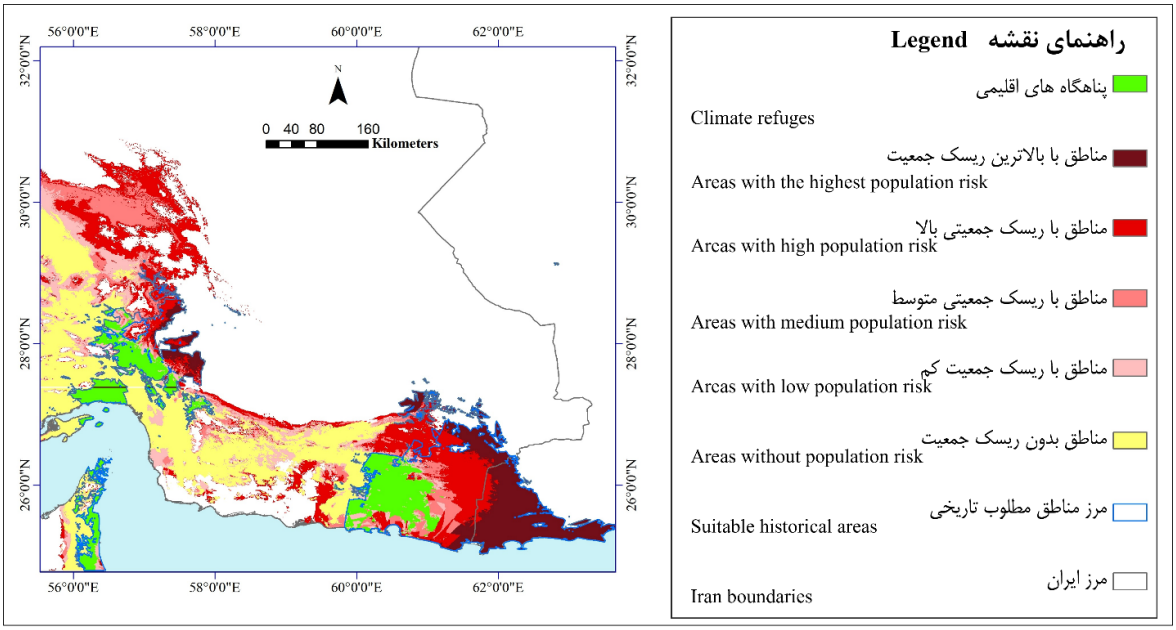


شکل ۳- تغییرات مساحت مناطق مطلوب و نامطلوب در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۷۰

Fig.3. Changes in the area of suitable and unsuitable areas during the period of 2017 - 2070

پیش‌بینی مناطق بحرانی جمعیت تمساح مردابی در اثر تغییرات اقلیم

شکل ۴ نقشهٔ مناطق بحرانی جمعیت بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، مناطقی که تنها در یکی از سناریوهای تغییر اقلیم، مطلوب بوده و بنابراین دارای بالاترین ریسک جمعیتی در آینده خواهند بود، با بخش وسیعی از مناطق مطلوب تاریخی نیز همپوشانی دارند. مناطق با ریسک بالا و ریسک پایین جمعیتی نیز به ترتیب در دو و سه سناریو تغییر اقلیم مطلوب هستند و مناطقی که کاملاً از نظر تغییرات اقلیمی فاقد ریسک هستند در چهار سناریو تغییر اقلیم مطلوب باقی خواهند ماند. تلاقی مناطق بدون ریسک و مناطق مطلوب تاریخی نشان‌دهنده پناهگاه‌های اقلیمی است. این مناطق در اثر تغییرات اقلیمی، شرایط محیطی پایدارتری را برای گونه فراهم می‌کنند و به آنها اجازه می‌دهند از اثرات منفی تغییرات آب‌وهوایی در امان بمانند.



شکل ۴- پیش‌بینی پهنه‌های بحرانی جمعیتی تمساح مردابی تا سال ۲۰۷۰

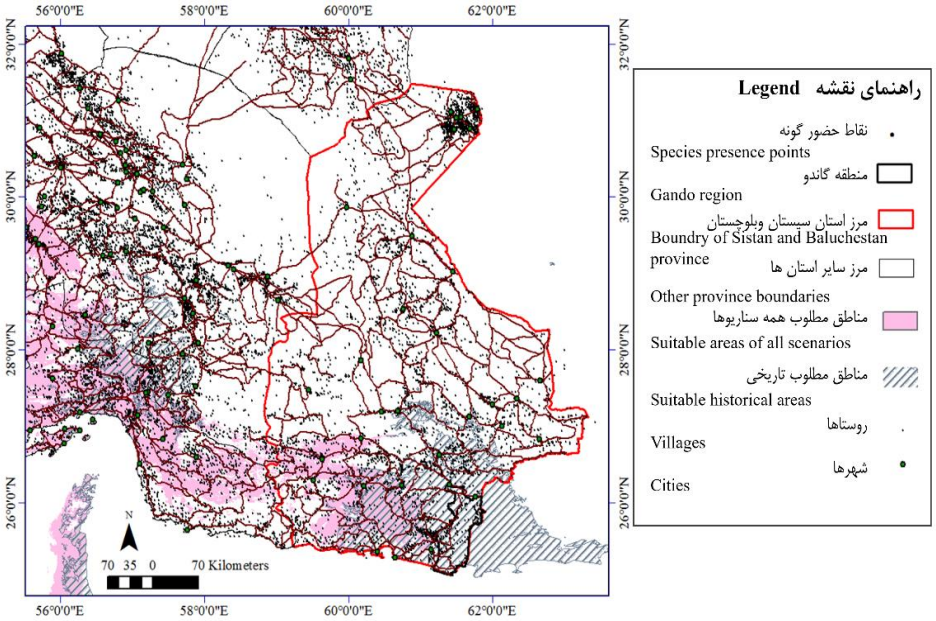
Fig.4. Predicted critical population zones of the marsh crocodile by 2070

آشکارسازی تعارض تمساح مردابی /انسان در سال ۲۰۷۰

با توجه به اینکه تلاقی سکونتگاه‌های انسانی با شبکه جاده‌ها و مناطق مطلوب زیستگاهی دارای بالاترین ریسک ایجاد تعارض بین تمساح/ انسان است، لایه این مناطق با مناطق مطلوب زیستگاهی حال و آینده (بخش مشترک بین چهار سناریوی اقلیمی) روی‌هم گذاری شد (شکل ۵). بر اساس شکل ۵ کمترین تعارض در محدوده منطقه حفاظت شده گاندو وجود دارد که با اثرات تغییر اقلیم وسعت زیادی از آن تبدیل به مناطق نامطلوب در آینده خواهد شد.

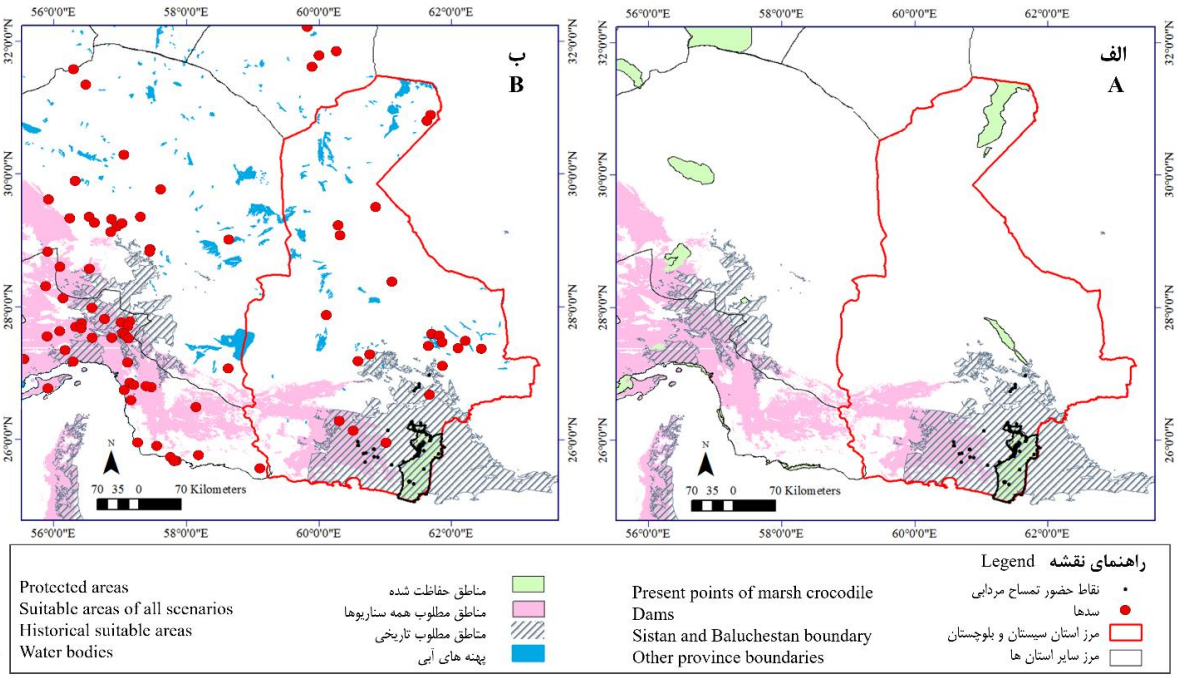
کفایت منطقهٔ حفاظت شده گاندو در حفاظت از تمساح مردابی در آینده

بر اساس نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده در بخش قبل تغییرات اقلیم منجر به عدم کفایت منطقه حفاظت شده گاندو جهت حمایت از زیست این گونه خواهد شد (شکل۲). شکل ۶ فصل مشترک تقاطع مناطق مطلوب چهار سناریو تغییر اقلیم را با مناطق مطلوب تاریخی و به عبارتی پناهگاه‌های اقلیمی را نشان می‌دهد. در این شکل نیز به خوبی روشن است که پناهگاه‌های اقلیمی خارج از منطقه حفاظت شده گاندو قرار دارد. با توجه به عدم کارایی منطقه حفاظت شده گاندو در حمایت از بقا گونه در ادامه شبکه مناطق حفاظت شده نیز مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۶ (الف) تقاطع مشترک مناطق مطلوب زیستگاهی تحت چهار سناریوی تغییر اقلیم و پراکنش مناطق حفاظت شده را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل شبکه مناطق حفاظت شده در آینده در محدوده‌های مطلوب زیستگاهی این گونه قرار ندارند و حتی با معرفی گونه به این مناطق به دلیل خصوصیت TSD آن، از ساختار جنسی جمعیتی پایداری برخوردار نخواهند بود. با این حال این شکل می‌تواند در توسعهٔ شبکهٔ مناطق حفاظت شده، مورد استفاده قرار گیرد و یا حتی جهت معرفی گونه در خارج از مناطق حفاظت شده نیز کاربرد دارد که در این صورت اگر چه ممکن است افزایش وسعت مناطق مطلوب زیستگاهی از نظر پارامترهای اقلیمی به نظر واقعه‌ای مثبت قلمداد شود، اما چالش اصلی که این گونه را در آینده تهدید می‌کند، عدم وجود منابع آب شیرین در گستره‌های مطلوب زیستگاهی است (شکل ۶ ب).



شکل ۵- تقاطع مناطق مطلوب زیستگاهی با سکونتگاه‌های انسانی و شبکه جاده‌ها جهت آشکارسازی مناطق بالقوه تعارض تمساح/انسان در آینده

Fig.5. Intersection of suitable habitat areas with human settlements and road networks to reveal potential areas of future human/crocodile conflicts



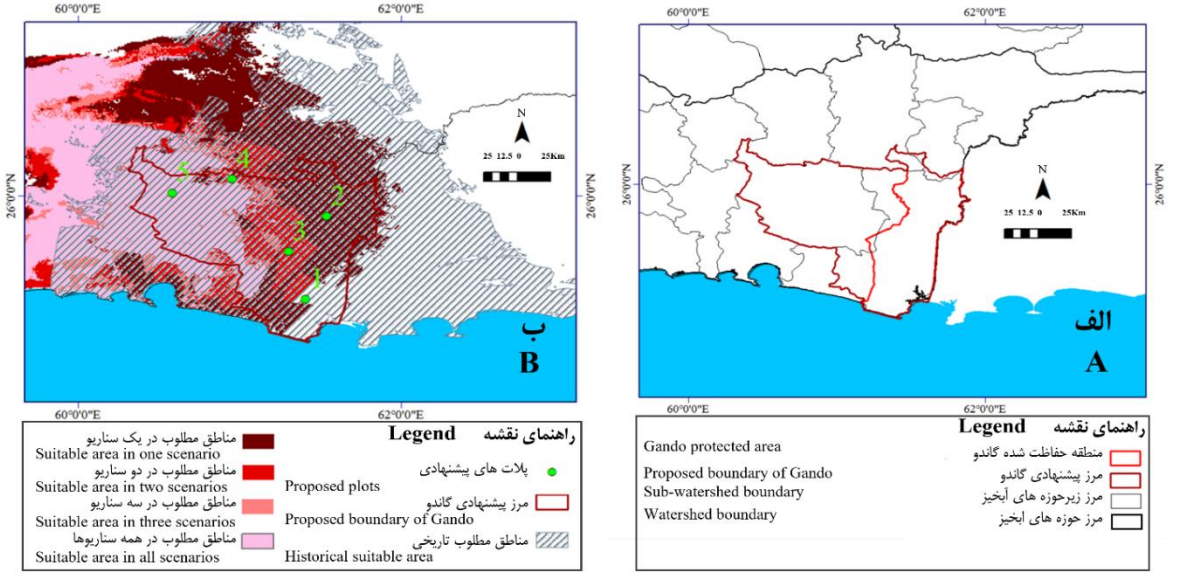
شکل ۶- تلاقی زیستگاه‌های مطلوب مشترک در چهار سناریوی اقلیمی با مناطق حفاظت شده (الف) و منابع آبی (ب)

Fig.6. Intersection of the common suitable habitats in four climate scenarios with protected areas (a) and water resources (b)

مرز پیشنهادی منطقهٔ حفاظت شده گاندو و پلات‌های دائمی جهت پایش جمعیت تمساح مردابی

با توجه به وابستگی این گونه به مناطق تالابی آب شیرین، مهم‌ترین مسأله زیستگاهی آن وجود منابع آبی در مناطق مطلوب زیستگاهی حال و آینده است. از آنجایی‌که وجود منابع آبی تنها به مدیریت زیستگاه تاریخی و مجاور آن مرتبط نبوده، بلکه به کل حوزهٔ آبخیز وابسته است، ماهیت پیوستهٔ رودخانه‌ها را باید در مرز مناطق حفاظت شده لحاظ نمود و بهترین حالت استفاده از مرزهای طبیعی زیرحوزه‌های آبخیز در اصلاح مرز مناطق حفاظت شده و تقویت شبکه مناطق حفاظت شده است. با توجه به پیش‌بینی انجام شده تا سال ۲۰۷۰ بخش عمده و یا کل منطقه حفاظت شده گاندو خارج از محدوده مطلوب زیستگاهی از نظر فاکتورهای اقلیمی قرار خواهد گرفت، به عنوان پیشنهاد مدیریتی برای حفاظت این گونه اصلاح مرز و افزایش محدودهٔ منطقهٔ حفاظت شده مطرح می‌شود. شکل ۷ (الف) به عنوان مرز پیشنهادی برای منطقه حفاظت شدهٔ گاندو با در نظر گرفتن اثر تغییر اقلیم بر گونه تمساح مردابی، پناهگاه‌های اقلیمی، پراکنش نقاط حضور گونه و توجه به وجود کمترین تضاد تمساح مردابی با انسان توصیه می‌شود. همانطوری که تصویر نیز نشان می‌دهد با توجه به وابستگی گونه به مدیریت حوزهٔ آبخیز در بالادست، این مرز منطبق بر مرز زیرحوزه‌های آبخیز انتخاب شده است.

استقرار پلات‌های دائمی برای پایش گونه تمساح مردابی ضروری است که به عنوان پیشنهاد پلات‌های شکل ۷ (ب) ارائه شده است. محل این پلات‌های پیشنهادی در حال حاضر زیستگاه تمساح مردابی بوده و این گونه در این مکان‌ها مشاهده شده است. در این شکل پلات ۱ در منطقهٔ مطلوب تاریخی قرار دارد که در تمام سناریوهای آینده خارج از منطقه مطلوب زیستگاهی قرار خواهد گرفت. پلات ۲ تنها در یک سناریو تغییر اقلیم مطلوب بوده و پلات‌های ۳، ۴ و ۵ به ترتیب در دو، سه و چهار سناریو مطلوب خواهند ماند. به این ترتیب انتظار می‌رود که با پایش پنج پلات پیشنهادی اثر تغییر اقلیم بر روی زیستگاه و جمعیت این گونه قابل ردیابی باشد.

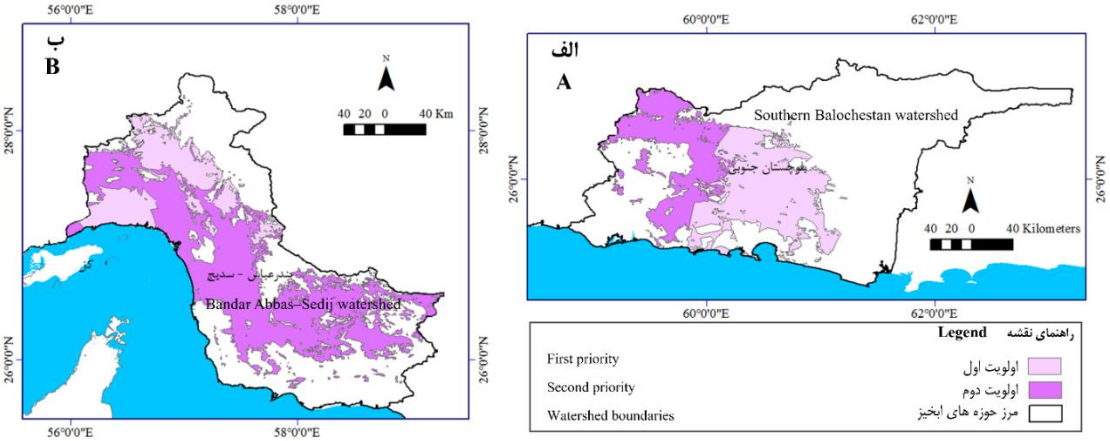


شکل ۷- مرز پیشنهادی منطقهٔ حفاظت شده گاندو (الف) و پلات‌های دائمی پیشنهادی برای پایش جمعیت تمساح مردابی (ب)

Fig.7. Proposed boundary of the Gando Protected Area (a) and proposed permanent plots for monitoring the population of the marsh crocodile (b)

اولویت‌بندی مناطق مناسب مهاجرت کمکی

برای شروع انجام مطالعات امکان‌سنجی محلی انتقال گونه به زیستگاه‌های جدید، مکان‌های مشترک مطلوب حال و آینده توصیه می‌شود. بر این اساس شکل ۸ اولویت‌های اول و دوم مطالعه را برای حوزه‌های آبخیز بلوچستان جنوبی و بندر عباس- سدیج نشان می‌دهند. مناطق دارای اولویت نخست، پناهگاه‌های اقلیمی را در برمی‌گیرد که هم براساس داده‌های تاریخی و هم در تمامی سناریوهای تغییر اقلیم دارای مطلوبیت زیستگاه است. مناطق معرفی شده به عنوان اولویت دوم نیز شامل مناطقی است که در چهار سناریوی اقلیمی آینده مطلوب هستند. اگر چه حوزهٔ پراکنش این گونه در حال حاضر تنها در حوزه آبخیز بلوچستان جنوبی است، اما با توجه به وجود مناطق مطلوب زیستگاهی به لحاظ فاکتورهای اقلیمی در حوزه آبخیز بندرعباس- سدیج، مکان‌های دارای اولویت در این حوزه آبخیز نیز شناسایی شد.



شکل ۸- مکان‌های با اولویت برای مطالعات امکان‌سنجی انتقال گونه به زیستگاه‌های جدید در حوزه‌های آبخیز بلوچستان جنوبی (الف) و بندرعباس سدیج (ب)

Fig.8. Priority locations for feasibility studies of species translocation to new habitats in southern Balochestan watershed (A) and Bandar Abas-sedij watershed (B)

بحث و نتایج

بر اساس نتایج به دست آمده در تمام سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5 افزایش وسعت منطقهٔ مطلوب زیستگاهی برای تمساح مردابی بر اساس تغییر فاکتورهای اقلیمی در سال ۲۰۷۰ دیده شد. این افزایش وسعت در سناریوی RCP2.6 بیشترین و در RCP6.0 کمترین مقدار است. در تمام موارد چه سناریوی اول که خوشبینانه‌ترین وضعیت را برای آینده متصور می‌کند و چه سناریوی چهارم که حاکی از بدترین وضعیت در آینده خواهد بود، گسترش مطلوبیت زیستگاه، رو به غرب و کمی نیز به سمت شمال است (شکل‌های ۲، ۳ و ۶). مقایسهٔ نتایج حاصل از این مطالعه که مبتنی بر زیست‌اقلیم‌های پایگاه داده KGClim انجام شده است، با یافته‌های مبارکی و همکاران (Mobaraki et al., 2023) که از داده‌های خروجی مدل‌های گردش عمومی جهانی بر اساس سناریوهای ssp126، ssp245، ssp370 و ssp585 گزارش ششم IPCC و داده‌های بانک اطلاعاتی WorldClim در بازه زمانی ۲۰۸۱ تا ۲۱۰۰ بهره برده‌اند، نشان می‌دهد که محدوده‌های زیستگاهی مطلوب در مدل‌های مبتنی بر KGClim از پیوستگی مکانی بیشتری برخوردارند. همچنین، تفاوت در بازه زمانی مورد مطالعه از جمله عوامل تأثیرگذار بر تفاوت نتایج بین این پژوهش و مطالعه مذکور بوده است. با این حال با توجه به تفاوت در دوره‌های آماری و همچنین اصلاح اریبی‌ها و انطباق بالاتر با ویژگی‌های توپوگرافی و کاربری اراضی (Cui et al., 2021)، می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های KGClim دقت اقلیمی بیشتری دارند. از این‌رو، متغیرهای مستقل استفاده شده در مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه در این مطالعه از اعتبار بالاتری برخوردارند. افزون بر این، داده‌های حضور گونه نیز در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۳ جمع‌آوری شده‌اند که همخوانی زمانی مناسبی با داده‌های اقلیمی KGClim دارند و می‌توانند به افزایش دقت مدل‌سازی کمک کنند. این مسئله در پژوهش‌های پیشین نیز مورد تأکید قرار گرفته است (Erfani & Salmanmahiny, 2025).

مطالعهٔ گونه‌های دارای خصوصیت TSD از جمله تمساح مردابی، با توجه به حساسیت بالا به تغییرات اقلیمی به عنوان بیوانديکاتورهای مهم تغییر اقلیم بیش از سایر گونه‌ها اولویت دارند، از این رو مورد توجه پژوهشگران بسیاری در سال‌های اخیر قرار گرفته‌اند (Elbahi et al., 2024; Sinervo et al., 2024; Li et al., 2024; Xiao et al., 2025). اما با وجود هشدارهای مکرر پژوهشگران در خصوص تأثیر افزایش دما بر عدم توازن نسبت جنسی و پویایی جمعیت تمساح مردابی (Bock et al., 2020; Mobaraki et al., 2023)، تاکنون ارزیابی فضایی و نقشه‌سازی نواحی بحرانی از منظر تغییرات اقلیمی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مطالعهٔ حاضر با ارائه نقشه پهنه‌بندی ریسک جمعیتی، برای نخستین‌بار طیفی از مناطق بدون ریسک تا پر ریسک را مشخص کرده است. بر اساس این نتایج، بخش‌های غربی استان سیستان و بلوچستان در محدوده کم‌خطر قرار گرفته‌اند (شکل ۴) که می‌توانند به عنوان پناهگاه‌های اقلیمی بالقوه در برنامه‌ریزی‌های حفاظتی مدنظر قرار گیرند.

تغییر زیستگاه در اثر تغییرات اقلیمی موجب افزایش تعارض تمساح/ انسان خواهد شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده کمترین تعارض در محدودهٔ منطقه حفاظت شده گاندو وجود دارد که تحت تأثیر تغییر اقلیم وسعت زیادی از آن تبدیل به مناطق نامطلوب در آینده خواهد شد (شکل ۵). مناطق مطلوب در قسمت شمالی خلیج چابهار نیز دارای تضاد کمتری در آینده خواهد بود که با توجه به مجاورت با زیستگاه‌های مطلوب تاریخی، احتمال مهاجرت گونه را در صورت وجود پهنه‌های آبی بالا می‌برد. البته لازم به ذکر است در همه پهنه‌های آبی شیرین نیز این تعارض وجود دارد و با کمبود روزافزون آب شیرین، این تعارض از این جنبه نیز شدت خواهد گرفت. افزایش تعرض تمساح/ انسان در اثر تغییرات اقلیمی برای گونه وابسته به آب شیرین دیگر از تمساح (*Gavialis gangeticus*) نیز تأیید شده است (Abedin et al., 2025). افرادی نیز تغییرات اقلیمی را به عنوان تقویت‌کننده قوی و در عین حال نادیده گرفته شده تعارض انسان و حیات وحش معرفی کرده‌اند، زیرا کمبود منابع را تشدید می‌کند، رفتارها و توزیع‌های انسان و حیوان را تغییر می‌دهد و از این رو تعارض انسان و حیات وحش را افزایش می‌دهد (Abrahms et al., 2023). اما تا کنون این تعارض برای تمساح مردابی به صورت مکانی در مطالعه‌ای بررسی نشده بود. با وجود این که رویهٔ به کار رفته در مطالعهٔ حاضر جهت نشان دادن مکان‌های احتمالی این تعارض کاربرد دارد، اما نیاز به مطالعات تکمیلی در این خصوص بوده که برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود.

بر اساس نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده تغییرات اقلیم منجر به عدم کفایت منطقه حفاظت شده گاندو جهت حمایت از زیست این گونه خواهد شد (شکل‌های ۲ و ۶ الف). به نحوی که در خوشبینانه‌ترین سناریو یعنی RCP2.6 بخش جنوبی و شرقی این منطقه پتانسیل مطلوبیت زیستگاه خود را از دست خواهد داد و از سناریوی RCP4.5 به RCP8.5 کاملاً تبدیل به مناطق نامطلوب خواهد شد. شفیعی‌زاده و همکاران (Shafiezadeh, Moradi, Fakheran & Pourmanafi, 2018) نیز در بخشی از مطالعهٔ خود در جنوب شرق ایران اقدام به ارزیابی مطلوبیت زیستگاه تمساح مردابی کردند. آنها نشان دادند که تنها ۱۵ درصد از زیستگاه‌های حساس تحت پوشش مناطق حفاظت شده هستند که از نظر عدم کفایت مناطق حفاظت شده جهت حمایت از تنوع زیستی همراستا با نتایج مطالعه حاضر است. چنین نتایجی توسط برخی از پژهشگران در نقاط دیگر دنیا نیز گزارش شده است (Elbahi et al., 2024 ; Sinervo et al., 2024).

همچنین با تغییر شرایط اقلیمی، تغییر گستره پراکنش گونه قابل انتظار خواهد بود. این تغییر پراکنش و جمعیت در شرایط خشکسالی و سیلابی بودن در مطالعات مختلف اثبات شده است (Heydari et al., 2022؛ Mobaraki, 2015) همچنین مطالعات دیگر بر روی برخی گونه‌های دیگر از خزندگان مانند جکو عنکبوتی ایرانی (*Agamura persica*) (Yousefkhani, Aliabadian, Rastegar Pouyani & Darvish, 2017)، آگامای قفقازی(*Paralaudakia caucasia*)، مارمولک دم خاردار عراقی (*Saara loricata*) (Kafash, Kaboli & Köhler, 2015) و ۳۰ گونه خزنده دیگر (Vaissi, 2022) نیز در ایران نتایج مشابهی را با گسترش زیستگاه گونه‌های مورد مطالعه به شمال و غرب در آینده گزارش کردند. با وجود افزایش کلی محدوده‌های مطلوب پیش‌بینی شده در آینده، محدوده‌های مطلوب تاریخی حفظ نخواهند شد و کاهش وسعت زیستگاه‌های مطلوب کنونی قابل انتظار است. گسترش توزیع گونه‌ها رو به شمال یا ارتفاعات بالاتر و کاهش آنها در حاشیه‌های جنوبی و ارتفاعات پایین‌تر در نیمکره شمالی به دلیل انقراض‌های محلی و تغییر دامنه انتشار در برخی از مطالعات انجام شده در نیمکره شمالی نیز گزارش شده است (Sinervo et al., 2024).

اگرچه بر اساس پیش‌بینی‌های مدل، وسعت مناطق با شرایط اقلیمی مطلوب برای تمساح مردابی افزایش می‌یابد، اما مهم‌ترین چالش پیش‌روی این گونه در آینده، عدم تطابق بین این مناطق مطلوب و توزیع منابع آب شیرین مورد نیاز آن است. همان‌طور که در شکل ۶ (ب) مشاهده می‌شود، بسیاری از مناطق با قابلیت زیست‌پذیری آینده، فاقد منابع آب شیرین کافی برای بقای تمساح مردابی هستند. علاوه بر این، بیشترین کاهش در مطلوبیت زیستگاه‌ها در بخش‌های جنوبی محدوده پراکنش گونه مورد انتظار است که شامل مناطقی است که در حال حاضر از تنوع منابع آبی برخوردارند. در مطالعات انجام شده در هند نیز برای گونه‌ای دیگر از تمساح‌ها، این جابه‌جایی و افزایش وسعت منطقه مطلوب زیستگاهی در آینده پیش‌بینی شده است (Abedin et al., 2025). با توجه به توان سازگاری بالای گونه با زیستگاه‌های مصنوعی مانند استخرهای ذخیره آب، کانال‌ها و مخازن سدها، امکان بهره‌برداری از این نوع زیستگاه‌ها به‌عنوان پناهگاه‌های جایگزین در مواجهه با تغییرات اقلیمی وجود دارد، اما باید برای مکان‌های تخم‌گذاری خصوصاً در زیستگاه‌های سازه‌ای مانند سدها تدابیری اندیشیده شود (Mobaraki et al., 2023).

عدم کفایت منطقهٔ حفاظت شده گاندو و همچنین شبکهٔ مناطق حفاظت شده (شکل ۶) در حمایت از بقا گونه در اثر تغییرات اقلیم در آینده، ضرورت اصلاح مرز و شبکه مناطق حفاظت شده را آشکار ساخت. اگر چه فلسفه وجودی مناطق حفاظت شده به ندرت به دلیل سازگاری با اثرات تغییرات آب و هوایی بوده است، اما جهت گسترش شبکهٔ مناطق حفاظت شده و اصلاح مرزهای آن نیاز به بازبینی در این تفکر است. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده امکان تعریف زون بازسازی در محدوده منطقه حفاظت شده گاندو وجود ندارد، چرا که این منطقه در آینده خارج از پناهگاه اقلیمی قرار خواهد گرفت و تمساح مردابی به دلیل خصوصیت TSD (Foden et al., 2016)، از ساختار جنسی جمعیتی پایداری برخوردار نخواهد بود. بنابراین تغییر گسترهٔ مطلوب برای این گونه در آینده، قطعی است و باید تدابیری جهت حفظ گونه از طریق پیش‌بینی زیستگاه‌های جدید و کریدورهای ارتباطی جهت مهاجرت و یا انتقال گونه به مناطق غربی‌تر و شمالی‌تر اندیشید. ضرورت تغییر و اصلاح مرز مناطق حفاظت شده مستقیماً توسط برخی از محققین اشاره شده است (Bao & Yang, 2024). همچنین در مطالعه‌ای دیگر نویسندگان با استفاده از مدل‌سازی حداکثر بی‌نظمی

به‌صراحت نشان دادند که چگونه بازطراحی زون‌ها و مرز مناطق حفاظت‌شده، در پاسخ به کمبود داده و فشارهای انسانی می‌تواند به شناسایی و تعیین اولویت زیستگاهی برای گونه‌های پرخطر و مدیریت مؤثرتر مرزها برای حمایت از آن‌ها منجر شود (Ducros et al., 2023). در مطالعهٔ انجام شده در ایالات متحده و مکزیک نیز مهاجرت کمکی و حفاظت گونه‌ها در پناهگاه‌های اقلیمی (که در معرفی مناطق حفاظت شده جدید استفاده شده‌اند) به عنوان راهکارهای مؤثر برای حفاظت از گونه‌ها معرفی شده است (Sinervo et al., 2024). برخی نیز با تأکید بر ناکارآمدی پراکنش فعلی مناطق حفاظت‌شده، نتیجه گرفتند که اولویت‌گذاری حفاظتی باید به‌سوی نواحی کمتر حفاظت‌شده متمایل شود، چرا که بیشتر زیستگاه‌های حساس خزندگان در خارج از این مناطق قرار دارند (Elbahi et al., 2024).

بر اساس نتایج مدل‌سازی‌ها، پراکنش تاریخی نقاط حضور گونه، پناهگاه‌های اقلیمی و تعارض تمساح/ انسان، مرز پیشنهادی برای منطقهٔ حفاظت شده گاندو ارائه شد. لازم به ذکر است که جهت نهایی کردن مرز پیشنهادی برای منطقه حفاظت شده گاندو فاکتورهای بیشتری علاوه بر فاکتورهای اقلیمی در قالب مطالعه جداگانه‌ای مورد نیاز است و مرز پیشنهادی در شکل ۷ به عنوان مرز اولیه بر اساس فاکتورهای اقلیمی و نتایج مدل‌سازی این پژوهش مطرح است.

پایش جمعیت، نسبت جنسی و موفقیت تولید مثل در پلات‌های پیشنهادی این مطالعه (شکل ۷-ب) ـ که بازتابی از طیف اثرات اقلیمی در محدوده پیشنهادی برای منطقه حفاظت‌شده گاندو هستند ـ می‌تواند به شناسایی زودهنگام تهدیدهای ناشی از تغییر اقلیم کمک کند. از سوی دیگر، ویژگی‌های زیستی خاص این گونه، از جمله خونسرد بودن و وابستگی بالا به پارامترهای دمایی و آبی (TSD)، آن را به گونه شاخص برای سنجش اثرات تغییر اقلیم بدل کرده و به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای برنامه‌های مهاجرت کمکی مطرح می‌سازد. همچنین اگرچه در این مطالعه مکان‌های مناسبی به‌عنوان پناهگاه‌های اقلیمی برای مهاجرت کمکی گونه شناسایی شده‌اند، اجرای این انتقال مستلزم مطالعات میدانی و محلی تکمیلی است. بر این اساس، مکان‌های اولویت‌بندی‌شده در این پژوهش می‌توانند به‌عنوان نقاط هدف در حوزه آبخیز اصلی و مجاور آن برای تحقیقات آتی پیشنهاد شوند (شکل ۸). با توجه به اینکه تغییرات اقلیمی منجر به جابه‌جایی در گستره‌های مطلوب زیستگاهی می‌شوند، بازنگری در مرزهای مناطق حفاظت‌شده و افزایش وسعت آن‌ها در آینده اجتناب‌ناپذیر خواهد بود؛ موضوعی که می‌تواند چالش‌هایی جدی با کاربری‌های انسانی پیرامونی ایجاد کند. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود در طراحی مناطق جدید حفاظت‌شده، رویکردی انعطاف‌پذیرتر در زون‌بندی اتخاذ شود، به‌ویژه با الگوبرداری از ساختار ذخیره‌گاه‌های زیست‌کره که امکان حضور انسان و بهره‌برداری محلی را در چارچوبی منعطف‌تر فراهم می‌سازند.

نکتهٔ بسیار مهم در مورد وضعیت حفاظتی گونه این است که طبقه‌بندی آن در فهرست IUCN به‌عنوان کمترین نگرانی (LC[1]) نشان می‌دهد که ملاک طبقه‌بندی عمدتاً مبتنی بر شرایط تاریخی گونه بوده است. در مقابل، پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم، آینده‌نگر بوده و می‌تواند نقش مؤثری در جهت‌گیری‌های حفاظتی ایفا کند. از این‌رو، کاهش چشم‌گیر زیستگاه‌های بالقوه مطلوب کنونی در آینده، پیش‌بینی افزایش تعارض با انسان، ناکافی بودن مناطق حفاظت‌شده و گسترش مناطق بحرانی برای بقای جمعیت، همگی عواملی هستند که باید در بازنگری وضعیت حفاظتی گونه مدنظر قرار گیرند. در صورت تغییر وضعیت گونه به آسیب‌پذیر (مطابق با معیارهای گروه B در طبقه‌بندی لیست قرمز IUCN)، می‌توان انتظار داشت که تلاش‌های حفاظتی در سطح ملی و بین‌المللی نیز تقویت شود. چنین رویکردی در مطالعه‌ای روی چند گونه سوسمار از جنس *Diploderma* نیز به‌کار رفته است؛ با وجود این که این گونه‌ها در طبقه LC قرار داشتند، اما به دلیل کاهش قابل توجه دامنه پراکنش پیش‌بینی‌شده در آینده، واجد شرایط برای طبقه‌بندی مجدد به‌عنوان گونه‌های آسیب‌پذیر معرفی شدند (Xiao et al., 2025).

1- Least Concern

همچنین لازم به ذکر است که تغییر نسبت جنسی نوزادان به نفع تولید فرزندان نر در اثر تغییرات اقلیم تا کنون برای گونه TSD دیگری (*Alligator mississippiensis*) گزارش شده است که ضرورت مطالعات دقیق‌تر بر آستانه‌های دمایی، نسبت جنسی و اثربخشی اقدامات مدیریتی در جمعیت‌های مختلف، به‌ویژه جمعیت‌های حاشیه‌ای و منزوی در ایران، را برای مطالعات آینده برجسته می‌سازد. با توجه به اینکه سازگاری (انعطاف‌پذیری فنوتیپی) می‌تواند خطر انقراض گونه‌ها را در اثر تغییرات اقلیم کاهش دهد، بررسی تغییرات فنوتیپی در جمعیت‌های پراکنده تمساح مردابی پیشنهاد می‌شود. این تغییرات به ندرت در مدل‌های اکوفیزیولوژیک گنجانده شده‌اند و تنها توسط پژوهشگران اندکی بر روی خزندگان دارای ویژگی TSD (Sinervo et al., 2024) مورد توجه قرار گرفته‌اند.

بررسی مطالعات انجام شده خصوصاً بر روی خزندگان دارای ویژگی TSD نشان داد که سیر مطالعات مطلوبیت زیستگاه به سمت تلفیق آنها با مطالعات مورفولوژیکی، ژنتیکی و برآورد جمعیت مؤثر (Xiao et al., 2025; Xu et al., 2025) است که برای مطالعات آینده بر روی تمساح مردابی نیز توصیه می‌شود. همچنین با توجه به انتشار داده‌های جدیدتر در قالب گزارش ششم IPCC (AR6) و سناریوهای اجتماعی-اقتصادی SSP بر اساس مدل‌های CMIP6، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از این داده‌ها برای تحلیل‌های دقیق‌تر و مقایسه‌پذیر در خصوص آثار تغییر اقلیم بر روی گونه‌های خزنده TSD و سایر گونه‌ها استفاده شود.

نتیجه‌گیری

مطالعهٔ حاضر، با هدف بررسی امکان مهاجرت کمکی و اصلاح مرز مناطق حفاظت شده جهت حمایت از بقاء گونه تمساح مردابی تحت تأثیر تغییرات اقلیم انجام شد و نشان داد که علاوه بر منطقه حفاظت شده گاندو که زیستگاه اصلی کنونی گونه است، شبکهٔ مناطق حفاظت شده در آینده در حمایت از بقا گونه کارایی نخواهند داشت. عدم تغییر زیستگاه و یا به عبارتی تعریف زون بازسازی در محدوده منطقه حفاظت شده برای مناطق نامطلوب زیستگاهی از نظر اقلیمی نیز جهت حمایت از بقاء گونه به دلیل خصوصیت TSD گونه امکان‌پذیر نیست. زیرا هر گونه تغییر دمایی موجب تغییر جنسیت نوزادان و بالتبع تغییر در ساختار و ترکیب جمعیت گونه در آینده خواهد شد. با توجه به احتمال بالای تغییر مطلوبیت زیستگاه در آینده، مهاجرت کمکی جهت بقاء گونه اجتناب ناپذیر خواهد بود. قابلیت جابه‌جایی تمساح مردابی با وجود تغییرات اقلیمی تعارض تمساح/ انسان را بالا خواهد برد و بنابراین باید آگاهانه مسیر مهاجرت گونه را از طریق مهاجرت کمکی هموار کرد. در این رابطه بر اساس مدل‌سازی‌های انجام شده، مناطق بحرانی جمعیت و پناهگاه‌های اقلیمی برای گونه مکان‌یابی شد تا ضمن نشان دادن تعارض تمساح/ انسان، مرز پشنهادی برای اصلاح منطقهٔ حفاظت شده گاندو و پلات‌های پایش جمعیت این گونه نیز شناسایی و برای اقدامات عملی مهاجرت کمکی گونه نیز مکان‌های با اولویت جهت مطالعات تکمیلی محلی و میدانی پیشنهاد شد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله، تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقالهٔ حاضر مستخرج از طرح با شماره قرارداد ۱۴۰۲/۶۰۰/۵۵۷۵۵ مورخ ۱۴۰۲/۱۲/۸ از محل اعتبارات سازمان حفاظت محیط زیست است.

سپاسگزاری

مقاله حاضر مستخرج از طرح پژوهشی با شماره قرارداد ۱۴۰۲/۶۰۰/۵۵۷۵۵ مورخ ۱۴۰۲/۱۲/۸ از محل اعتبارات سازمان حفاظت محیط زیست است. مجری و همکاران طرح بر خود لازم دانسته که از تمامی مسئولین و کارشناسانان محترم ستادی و استانی که به نحوی در پیشبرد این طرح مشارکت داشته‌اند کمال تقدیر و تشکر را داشته باشند. همچنین بخشی از آن با حمایت غیرمالی دانشگاه زابل و کد پژوهانهٔ IR-UOZ-GR-4956 به انجام رسیده است که بدین‌وسیله از حمایت دانشگاه زابل سپاسگزاری به عمل آید.

References

Abedin, I., Singha, H., Singh, S., Mukherjee, T., Kim, H-W., & Kundu S. (2025). Riverine Realities: Evaluating Climate Change Impacts on Habitat Dynamics of the Critically Endangered Gharial (Gavialis gangeticus) in the Indian Landscape. *Animals*, *15*(6), 896. https://doi.org/10.3390/ani15060896

Abrahms, B., Carter, N. H., Clark-Wolf, T. J., Gaynor, K. M., Johansson, E., McInturff, A., ... & West, L. (2023). Climate change as a global amplifier of human–wildlife conflict. *Nature Climate Change*, *13*(3), 224-234. https://doi.org/10.1038/s41558-023-01608-5

Abtin, A., & Mobaraki, A. (2016). *Gandou: Marsh Crocodile in Iran*. Tehran: Talaie Publication. [In Persian]

Bao, S., & Yang, F. (2024). Identification of potential habitats and adjustment of protected area boundaries for large wild herbivores in the Yellow-River-Source National Park, China. *Land*, *13*(2), 186. https://doi.org/10.3390/land13020186

Benateau, S., Gaudard, A., Stamm, C., & Altermatt, F. (2019). *Climate change and freshwater ecosystems: Impacts on water quality and ecological status.* Eawag, Dübendorf. http://dx.doi.org/10.5167/uzh-169641

Bock, S. L., Lowers, R. H., Rainwater, T. R., Stolen, E., Drake, J. M., Wilkinson, P. M., ... & Parrott, B. B. (2020). Spatial and temporal variation in nest temperatures forecasts sex ratio skews in a crocodilian with environmental sex determination. *Proceedings of the Royal Society B*, *287*(1926), 20200210. http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2020.0210

Booth, T. A. (2022). Checking bioclimatic variables that combine temperature and precipitation data before their use in species distribution models. *Austral Ecology*, *47*(5), 1–12. https://doi.org/10.1111/aec.13234

Chang, M. S., Gachal, G. S., Qadri, A. H., Memon, K. H., Sheikh, M. Y., & Nawaz, R. (2015). Distribution, population status and threats of marsh crocodiles in Chotiari Wetland Complex, Sanghar, Sindh–Pakistan. *Biharean Biologist*, *9*(1), 22–28. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54764767

Cui, D., Liang, S., Wang, D., & Liu, Z. (2021). A 1 km global dataset of historical (1979–2017) and future (2020–2100) Köppen–Geiger climate classification and bioclimatic variables. *Earth System Science Data Discussions*, 1–33. https://doi.org/10.5194/essd2021-53

Dobrowski, S. Z., Littlefield, C. E., Lyons, D. S., Hollenberg, C., Carroll, C., Parks, S. A., ... & Gage, J. (2021). Protected-area targets could be undermined by climate change-driven shifts in ecoregions and biomes. *Communications Earth & Environment*, *2*(1), 198. https://doi.org/10.1038/s43247-021-00270-z

Ducros, D., Devillers, R., Messager, A., Suet, M., Wachoum, A. S., Deschamps, C., ... & Defos du Rau, P. (2023). Planning from scratch: A new modelling approach for designing protected areas in remote, data-poor regions. *Journal of Applied Ecology*, *60*(9), 2018-2030. https://doi.org/10.1111/1365-2664.14470

Elbahi, A., Dugon, M., Oubrou, W., El Bekkay, M., Hermas, J., & Lawton, C. (2024). Modelling the ecological niches of reptiles in highly biodiverse protected areas. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1–22. https://doi.org/10.1080/24749508.2024.2429227

El-Khalafy, M. M., El-Kenany, E. T., Al-Mokadem, A. Z., Shaltout, S. K., & Mahmoud, A. R. (2025). Habitat suitability modeling to improve conservation strategy of two highly-grazed endemic plant species in saint Catherine Protectorate, Egypt. *BMC Plant Biology*, *25*(1), 485. https://doi.org/10.1186/s12870-025-06401-4

Erfani, M., & Salmanmahiny, A. (2025). Habitat Management of Mugger Crocodile (Crocodylus palustris) through Regional- Scale Niche Modeling for Practical Conservation Planning. *Journal of Environmental Studies*, *51*(1), 41-58. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jes.2025.385203.1008549

Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, *37*(12), 4302–4315. https://doi.org/10.1002/joc.5086

Foden, W., Garcia, R., Platts, P., Carr, J., Hoffmann, A., & Visconti, P. (2016). *Selecting and evaluating CCVA approaches and methods*. In IUCN (Ed.), IUCN SSC guide lines for assessing species' vulnerability to climate change (pp. 17–32). Cambridge and Gland: IUCN.

Giovanelli, J. G. R., Siqueira, M. F., Haddad, C. F. B., & Alexandrino, J. (2010). Modeling a spatially restricted distribution in the neotropics: How the size of calibration area affects the performance of five presence only methods. *Ecological Modelling*, *221*, 215–224. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.10.009

Grigg, G., & Kirshner, S. (2015). *Biology and evolution of crocodylians*. & London: Comstock Publishing Associates, Cornell University Press.

Hällfors, M. H., Aikio, S., Fronzek, S., Hellmann, J. J., Ryttäri, T., & Heikkinen, R. K. (2016). Assessing the need and potential of assisted migration using species distribution models. *Biological Conservation*, *196*, 60–68. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.01.031

Heydari, N., Ebrahim Tehrani, M., Hosseini, M. R., Mohammadpour, O., Jan Parvar, H., & Ali Hosseini, A. A. (2022). Population survey and census of marsh crocodile, Crocodylus palustris in SE Iran. *Biodiversity and Animal Taxonomy*, *2*(1), 156-163. [In Persian] https://doi.org/10.22126/jbat.2022.8120.1025

Ihlow, F., Bonke, R., Hartmann, T., Geissler, P., Behler, N., & Rödder, D. (2015). Habitat suitability, coverage by protected areas and population connectivity for the Siamese crocodile Crocodylus siamensis Schneider, 1801. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, *25*, 544–554. https://doi.org/10.1002/aqc.2473

Kafash, A., Kaboli, M., & Köhler, G. (2015). Comparison of future climatic change effects on desert and mountain dwelling reptiles in Iran (Paralaudakia caucasia and Saara loricata). *Journal of Animal Environment*, *7*(3), 103–108. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jne.2017.214248.1232

Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., ... & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, *4*(1), 1-20. https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122

Lambert, C., & Virgili, A. (2023). Data stochasticity and model parametrisation impact the performance of species distribution models: Insights from a simulation study. *Peer Community Journal*, *3*(2), e34. http://dx.doi.org/10.24072/pcjournal.263

Li, Q., Shao, W., Jiang, Y., Yan, C., & Liao, W. (2024). Assessing Reptile Conservation Status under Global Climate Change. *Biology*, *13*(6), 436. https://doi.org/10.3390/biology13060436

Merkenschlager, C., Bangelesa, F., Paeth, H., & Hertig, E. (2023). Blessing and curse of BioClim variables: A comparison of different calculation schemes and datasets for species distribution modeling within the extended Mediterranean area. *Ecology and Evolution*, *13*(10), e10553. https://doi.org/10.1002/ece3.10553

Mobaraki, A. (2015). Sustainable management and conservation of the Mugger crocodile (Crocodylus palustris) in Iran (Unpublished MSc thesis). International University of Andalusia, Baeza, Spain.

Mobaraki, A., Erfani, M., Abtin, E., & Ataie, F. (2018). Assessing habitat suitability of the mugger crocodile using maximum entropy. *Environmental Sciences*, *16*(4), 47-62. [In Persian] https://envs.sbu.ac.ir/article_97996.html

Mobaraki, A., Erfani, M., Abtin, E., Brito, J. C., Wei, C. T., Ziegler, T., & Rödder, D. (2023). Last chance to see? Iran and India as strongholds for the Mugger Crocodile (Crocodylus palustris). *Salamandra*, *59*(4), 327–335. https://www.salamandra-journal.com/index.php/contents/2023-vol-59/2133-mobaraki-a-m-erfani-e-abtin-j-c-brito-w-c-tan-t-ziegler/file

Newbold, T., Oppenheimer, P., Etard, A., & Williams, J. J. (2020). Tropical and Mediterranean biodiversity is disproportionately sensitive to land-use and climate change. *Nature Ecology & Evolution*, *4*(12), 1630–1638. https://doi.org/10.1038/s41559-020-01303-0

Phillips, S. J., Dudík, M., & Schapire, R. E. (2024). Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). Retrieved March 24, 2024, from http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/

Rödder, D., Engler, J. O., Bonke, R., Weinsheimer, F., & Pertel, W. (2010). Fading of the last giants: An assessment of habitat availability of the Sunda gharial Tomistoma schlegelii and coverage with protected areas. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, *20*, 678–684. https://doi.org/10.1002/aqc.1137

Shafiezadeh, M., Moradi, H., Fakheran, S., & Pourmanafi, S. (2018). Modeling Focal-Species Habitat Suitability for Biodiversity Conservation Planning in the Southeastern Iran. *Iranian Journal of Applied Ecology*, *7*(3), 51-66. [In Persian] http://doi.org/10.29252/ijae.7.3.51

Sinervo, B., Reséndiz, R. A. L., Miles, D. B., Lovich, J. E., Rosen, P. C., Gadsden, H., ... & de la Cruz, F. R. M. (2024). Climate change and collapsing thermal niches of desert reptiles and amphibians: Assisted migration and acclimation rescue from extirpation. *Science of the Total Environment*, *908*, 168431. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168431

Urban, M. C. (2024). Climate change extinctions. *Science*, *386*(6726), 1123-1128. https://doi.org/10.1126/science.adp4461

Vaissi, S. (2022). Response of Iranian lizards to future climate change by poleward expansion, southern contraction, and elevation shifts. *Scientific Reports*, *12*, 2348. https://doi.org/10.1038/s41598-022-06330-4

Vasconcelos, R. N., Cantillo-Pérez, T., Franca Rocha, W. J., Aguiar, W. M., Mendes, D. T., de Jesus, T. B., ... & Oliveira, R. P. (2024). Advances and Challenges in Species Ecological Niche Modeling: A Mixed Review. *Earth*, *5*(4), 963-989. https://doi.org/10.3390/earth5040050

Xiao, Q., Shi, X. D., Shi, L., Yao, Z. Y., Chen, Y. H., Yang, W. Z., ... & Qi, Y. (2025). Enhanced risk assessment framework integrating distribution dynamics, genetically inferred populations, and morphological traits of Diploderma lizards. *Zoological Research*, *46*(1), 15-26. https://doi.org/10.24272/j.issn.2095-8137.2024.287

Xie, Y., Zhu, Q., Bai, H., He, H., & Zhang, Y. (2024). Combining ecosystem service value and landscape ecological risk to subdivide the riparian buffer zone of the Weihe River in Shaanxi. *Ecological Indicators*, *166*, 112424. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112424

Xu, R., Song, Q., Chen, D., & Guo, X. (2025). Lineage Diversification and Population Dynamics of the Qinghai Toad-Headed Agama (Phrynocephalus vlangalii) on the Qinghai–Tibet Plateau, with Particular Attention to the Northern Slope of the Kunlun–Arjin Mountains. *Animals: an Open Access Journal from MDPI*, *15*(3), 400. https://doi.org/10.3390/ani15030400

Xu, W., & Prescott, C. E. (2024). Can assisted migration mitigate climate change impacts on forests? *Forest Ecology and Management*, *556*, 121738. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121738

Yousefkhani, S. S. H., Aliabadian, M., Rastegar Pouyani, E., & Darvish, J. (2017). Predicting the impact of climate change on the distribution pattern of Agamura persica (Duméril, 1856) (Squamata: Gekkonidae) in Iran. *Belgian Journal of Zoology*, *147*(2), 137–142. https://doi.org/10.26496/bjz.2017.11

(Research Journal)

VOLUME 14, NO 56, Winter 2025

CONTENTS

Using the PS-InSAR Technique to Assess the Impacts of Land Subsidence on Road Bridges in Southwest Tehran **1**

Sasan Zangenehtabar, Mojtaba Yamani, Mohammad Sharifikia, Seyed Mousa Hoseini, Masoome Amighpey

Morphotectonic Analysis of the Sefidrood Basin, Iran: An Integrated Methodological Framework Based on the Fibonacci Sequence and Gamma Distribution for Identifying Active Structural Patterns **21**

Gholam Hassan Jafari

Channel Changes and Bank Erosion in the Khoramroud River During the Period 2006–2025 **43**

Mohammad Mahdi Hosseinzadeh, Shahram Amiri

Landslide Susceptibility Analysis with Emphasis on Earthquake Impacts (Case Study: Karand to Sarpolzahab Corridor) **66**

Hamid Ganjaeian, Milad Firozeh, Ali Mirakhorli, Toktam Yazdani

Evaluation of Soil Salinity Zonation Using Remote Sensing and Geostatistical Methods in the Alluvial Plain Lands of the Tigris River, Iraq **85**

Marvan Al-Refahi, Alireza Karimi, Ebrahim Mahmoudabadi, Morteza Akbari

Spatiotemporal Monitoring and Analysis of Snow Cover and Its Related Components in the Alborz Mountain Range **105**

Vahid Safarian

Short-Term Droughts Projection in Iran: A Comprehensive Analysis Based on the SSP5-8.5 Scenario **129**

Ali Reza Karbalaee, Faeze Shoja, Saeideh Ashrafi, Muhammad Kamangar

Assessment of Urban Flood Risk Mitigation (UFRM) Ecosystem Service with A Short-Term Approach (2 Years), Case Study: Tabriz Metropolitan **153**

Mahdi Herischian, Hassan Mahmoudzadeh

Assessing the Role of Smart Cities in Enhancing Urban Resilience against Environmental Hazards (Case Study: Zanjan City) **181**

Hossein Tahmasebi Moghaddam, Zahra Rasoulzadeh

Sustainable Design of Urban Green Spaces for Noise Mitigation under a Climate Adaptation Framework **201**

Ahmad Hossayni, Zeynab Karimzadeh Motlagh

Analysis of the Spatial Pattern of Physical Resilience of Rural Settlements in Rudbar County Against Earthquakes **230**

Maryam Zarghampour, Timur Amar, Parviz Rezaie

Assisted Migration and Protected Area Boundary Adjustment as Climate Adaptation Strategies to Supporting the Survival of TSD Reptiles (Lessons from Crocodylus Palustris) **251**

Malihe Erfani, Abdolrassoul Salmanmahiny

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: 1.5 (5 lines).
- 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 14, NO 56, Winter 2025

CONTENTS

Using the PS-InSAR Technique to Assess the Impacts of Land Subsidence on Road Bridges in Southwest Tehran **1**

Sasan Zangenehtabar, Mojtaba Yamani, Mohammad Sharifikia, Seyed Mousa Hoseini, Masoome Amighpey

Morphotectonic Analysis of the Sefidrood Basin, Iran: An Integrated Methodological Framework Based on the Fibonacci Sequence and Gamma Distribution for Identifying Active Structural Patterns **21**

Gholam Hassan Jafari

Channel Changes and Bank Erosion in the Khoramroud River During the Period 2006–2025 **43**

Mohammad Mahdi Hosseinzadeh, Shahram Amiri

Landslide Susceptibility Analysis with Emphasis on Earthquake Impacts (Case Study: Karand to Sarpolzahab Corridor) **66**

Hamid Ganjaeian, Milad Firozeh, Ali Mirakhorli, Toktam Yazdani

Evaluation of Soil Salinity Zonation Using Remote Sensing and Geostatistical Methods in the Alluvial Plain Lands of the Tigris River, Iraq **85**

Marvan Al-Refahi, Alireza Karimi, Ebrahim Mahmoudabadi, Morteza Akbari

Spatiotemporal Monitoring and Analysis of Snow Cover and Its Related Components in the Alborz Mountain Range **105**

Vahid Safarian

Short-Term Droughts Projection in Iran: A Comprehensive Analysis Based on the SSP5-8.5 Scenario **129**

Ali Reza Karbalaee, Faeze Shoja, Saeideh Ashrafi, Muhammad Kamangar

Assessment of Urban Flood Risk Mitigation (UFRM) Ecosystem Service with A Short-Term Approach (2 Years), Case Study: Tabriz Metropolitan **153**

Mahdi Herischian, Hassan Mahmoudzadeh

Assessing the Role of Smart Cities in Enhancing Urban Resilience against Environmental Hazards (Case Study: Zanjan City) **181**

Hossein Tahmasebi Moghaddam, Zahra Rasoulzadeh

Sustainable Design of Urban Green Spaces for Noise Mitigation under a Climate Adaptation Framework **201**

Ahmad Hossayni, Zeynab Karimzadeh Motlagh

Analysis of the Spatial Pattern of Physical Resilience of Rural Settlements in Rudbar County Against Earthquakes **230**

Maryam Zarghampour, Timur Amar, Parviz Rezaie

Assisted Migration and Protected Area Boundary Adjustment as Climate Adaptation Strategies to Supporting the Survival of TSD Reptiles (Lessons from Crocodylus Palustris) **251**

Malihe Erfani, Abdolrassoul Salmanmahiny

Ferdowsi University of Mashhad

Vol.14, No. 4, Winter 2025

Journal of Geography and Environmental Hazards

Research Journal



Published by: Ferdowsi University of Mashhad ISSN: 2322-1682

Hyrcanian forest wildfire, Elit–Chalus, Iran, November 2025 www.isna.ir