

سال چهاردهم، شماره ۳، پیاپی ۵۵، پاییز ۱۴۰۴

(نشریه علمی)

مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی





فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی ژئومورفولوژی

سال چهاردهم، شماره پنجاه و پنجم، پاییز ۱۴۰۴
شاپا چاپی: ۱۶۸۲-۲۳۲۲ شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۳۰۷۶

عنوان

- شناسایی منشأ گردوغبار با استفاده از تنسور مکانی-زمانی عمق اپتیکی آئروسول در محدوده شهرستان ایلام
رامین کرمی؛ حسین اعتمادفر
- تحلیل اثرات فرآیندهای تکتونیکی بر ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و ارزیابی پتانسیل خطر ناپایداری‌های دامنه‌ای در حوضه آبریز شهرچای ارومیه
فریبا همتی؛ صابر سید احمدی؛ اکرم علیزاده
- مدل سازی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی: مطالعه موردی حوضه آبریز سد شهید عباسپور، شمال شرق خوزستان
مهشید معاوی؛ هیوا علمیزاده؛ مژگان انتظاری
- بررسی ریخت‌زمین‌ساخت و لرزه‌خیزی بخش شمالی و جنوب خاوری ایران مرکزی
نجیم اسکندری نصب سیاهکوهی؛ مجید نعمتی؛ شهرام شفییعی بافتی
- بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی در روند سیلاب حوضه آبریز مردق‌چای با استفاده از مدل SWAT و شبکه عصبی مصنوعی
محمدحسین رضائی مقدم؛ عاطفه حقیقت؛ توحید رحیم پور؛ عبدالله بهبودی
- تحلیل ساختار و تغییر رژیم خشکسالی در ایران با رویکرد خوشه‌بندی سه‌بعدی
جواد مهدی زاده سولا؛ یوسف قویدل رحیمی؛ منوچهر فرج زاده
- پیش‌نگری و روندیابی بارش در شهرهای منتخب نیمه شمالی ایران با بهره‌گیری از مدل‌های ACCESS و CNRM
رقیه ملکی مرشت؛ برومند صلاحی؛ مهناز صابر
- مشخصات عمومی پدیده رعدوبرق در ایران
حمزه علی زاده؛ حسین عساکره؛ کوهزاد رئیس پور
- تحلیل فضایی-زمانی رخداد زلزله در ایران (۱۳۷۵-۱۴۰۳): یک مطالعه آسیب شناسانه با نگاهی به شهرها
رویا مقابلی؛ فائزه بهادری؛ علیرضا محمدی
- سدسازی در پرتو جرم‌شناسی سبز: تحلیل محتوای رمان «بعد از ابر»
حمیدرضا دانش ناری؛ ابوالفضل شرافتی
- تحلیل عوامل موثر بر آلودگی محیط‌زیست شهری در مناطق ساحلی (بندرانزلی، رضوانشهر و آستارا) با استفاده از مدل‌های (RF و AHP)
زهرا پورمقدم؛ مجتبی یمانی؛ منصور جعفر بیگلر
- شناسایی مناطق مستعد دفن زباله بر مبنای پارامترهای محیطی و اعمال مناطق ممنوعه (مطالعه موردی: شهرستان دالاهو)
سید اسداله حجازی؛ زهرا زنگنه تبار



دانشکده ادبیات و علوم انسانی

فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوس مشهد

مدیر مسئول: دکتر سید رضا حسین زاده

سر دبیر: دکتر سید رضا حسین زاده

هیئت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

بختیار فیضی زاده - دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS دانشگاه تبریز	Prof. Victor R. Baker (Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona)
منیره قهرودی تالی - استاد جغرافیای طبیعی - ژئومورفولوژی دانشگاه شهید بهشتی تهران	Prof. Ziyadin Çakır (Department of Geology, Istanbul Technical University)
علیرضا کریمی - استاد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد	Prof. Gao-Lin Wu (Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences)
غلامرضا لشکری پور - استاد گروه زمین شناسی، دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد	Assistant Prof. Masoud Irannezhad (Civil Engineering University of Oulu, Finland)
حسین محمدزاده - استاد گروه زمین شناسی، دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد	Assistant Prof. Dimitris G. Kaskaoutis (Chemical Engineering University of Western Macedonia: Kozani, Greece)
ابوالفضل مسعودیان - استاد اقلیم شناسی گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه اصفهان	Professor. Mingrui Qiang (Arid Environment and Climate Change Lanzhou University Lanzhou, China)
مسعود میرزائی شهرابی - استاد شیمی معدنی گروه شیمی، دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد	حمید اجتهادی - استاد گروه زیست شناسی، 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	محمد رضا اصفهانی - استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد
خلیل ولیزاده کامران - استاد، گروه سنجش از راه دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه تبریز	مرتضی اکبری - دانشیار بیابان زدایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد
احمد نوحه گر - استاد گروه برنامه ریزی مدیریت و آموزش محیط زیست دانشگاه تهران	علیرضا راشکی - استاد بیابان زدایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد
مجتبی یمانی - استاد جغرافیا - ژئومورفولوژی گروه جغرافیا طبیعی دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران	آذر زرین - دانشیار اقلیم شناسی گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه فردوسی مشهد
	شعبان شتایی جویباری - استاد سنجش از دور و سلفه اطلاعات جغرافیایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
	حسین شفیق زاده مقدم - دانشیار مهندسی و مدیریت آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

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

بر اساس آئین نامه 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: مهندس مریم محمدی شاندیز

ویراستاری علمی: دکتر سید رضا حسین زاده ویراستاری ادبی: انسیه سبک خیز خیاط

کارشناس اجرایی، حروف نگاری، صفحه آرایی و طراحی جلد: دکتر مهدیه غیور بلورفروشان

بر اساس سیاست دانشگاه فردوسی مشهد این نشریه به صورت الکترونیکی چاپ می شود و هیچ نسخه کاغذی ندارد.

نشانی: مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی، کد پستی: ۹۱۷۷۹۴۸۸۸۳

<https://geoeh.um.ac.ir/>

E-mail: geo.eh@um.ac.ir

نشانی اینترنتی:

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 می شود:

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

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

فصلنامه جغرافیا و مناظرات محیطی

(نشریه علمی)

سال چهاردهم، شماره پنجاه و پنجم، پاییز 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 بلاها 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، هوازگی نمکی، نفوذ آب شور، بیابان‌زایی و شوره‌زایی.
۳. خطرات اقلیمی و جوی: تغییرات اقلیمی، طوفان‌های گرد و غبار، هیوب، 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 امدادسانی، 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) می‌باشد.

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 می‌باشد.

الزامات قالب‌بندی:

ساختار مقاله شامل بخش‌های زیر می‌باشد:

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، حتماً 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 به صورت تک‌ستونه ارسال شود.
- کلیه صفحات مقاله باید دارای شماره بوده و تعداد صفحات مقاله پس از حذف جداول و شکل‌ها از ۱۵ صفحه 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 به صورت 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 درون‌متنی و منابع انتهای مقاله به زبان انگلیسی باشند (کلیه پراکنده‌های باز و بسته استنادهای درون‌متنی با فونت فارسی باشد).
- در کل متن، نیم‌فاصله‌ها رعایت شود.
- فهرست‌های عددی یا بولتی (تویی 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 به صورت ایتالیک درج شوند.
- عناوین شکل‌ها و جدول‌ها به دو صورت فارسی و انگلیسی به ترتیب با اندازه ۱۱ و ۱۰ نوشته شود.
- شماره جدول و شکل به صورت 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 به صورت مستقل با شماره‌گذاری از یک آغاز شود و فونت آن برای زبان فارسی B Nazanin, 10 و زبان انگلیسی Times New Roman, 9.

راهنمایی برای شفافیت و اختصار:

- از حروف اختصاری بیش از حد استفاده نشود.
- وقتی حروف اختصاری برای اولین بار در یک متن به کار می‌روند، 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 فایل‌های 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 می‌شوند، شماره گذاری کنید.
- هر تصویر به عنوان یک فایل جداگانه با نامگذاری به صورت 1، Fig.2 ارسال شود.
- در شکل‌های مورد استفاده از منابع دیگر، ارجاع درون و برون متنی ضروری می‌باشد.
- برای تمامی اطلاعات نوشته شده به زبان فارسی در داخل اشکال(نقشه‌ها، 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 به ترتیب از ۱ شماره گذاری شوند و شماره 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 به جای m/s از $m \cdot s^{-1}$ استفاده شود).

منابع

- شیوه‌نامه‌ای که باید در نوشتن منابع مورد استفاده قرار گیرد شیوه‌نامه انجمن روانشناسی آمریکا (APA) نسخه ۶ است. می‌توان برای افزایش بهره‌وری و راحتی در این کار 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 مورد استفاده 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، پایان نامه) و سایر اطلاعات مورد نیاز) 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 بی نام و غیرقابل دسترس خودداری شود.
- منابع بر اساس حروف الفبای نام نویسندگان آورده می شود.
- در منابع انتهایی مقاله، نام همه نویسندگان ذکر شود و از آوردن عبارت et al. و others به جای آوردن نام سایر نویسندگان منبع، خودداری شود.
- نام منبع (نشریه، کتاب و غیره) و ناشر مخفف نباشد و به طور کامل آورده شود.
- برای استناد به مقاله هایی که هنوز منتشر نشده اند، به جای سال نشر از (In press) استفاده شود.
- برای مقاله منتشر شده در نشریه، آوردن شماره نشریه (Issue) و شماره جلد الزامی است (طبق نمونه)، در صورتی که در اصل مقاله به شماره نشریه اشاره نشده است، می توان 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 مقاله های منتشر شده 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.

هزینه های مرتبط با انتشار

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

دستورالعمل های تکمیلی برای نویسندگان:

- مقاله خود را پس از انتشار، در پلتفرم های 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 شبکه های اجتماعی مانند توییتر، لینکدین و فیسبوک تبلیغ کنید.
- از هشتگ های مرتبط استفاده کنید و افراد یا مؤسسات تأثیرگذار در حوزه خود را تگ کنید.
- در ارائه های 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 پلتفرم هایی مانند SlideShare به اشتراک بگذارید.
- مقاله خود را برای همکاران، پژوهشگران و گروه های 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

استادیار دانشگاه باختر ایلام، ایلام، ایران	پاکزاد آزادخانی
استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران	مرضیه اسماعیل پور
استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران	صیاد اصغری
دانشیار گروه حقوق جزا و جرم شناسی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران	سراسکانرود
استادیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران	اعظم امینی
استاد گروه محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، همدان، ایران	لیلی ایزدی کیان
دانشیار آب و هواشناسی، دانشگاه سید جمال الدین اسدآبادی، اسدآباد، ایران	مهرداد چراغی
دانشیار گروه حقوق جزا و جرم شناسی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران	سید محمد حسینی
استاد اقلیم شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران	علیمراد حیدری
دانشیار گروه زمین شناسی، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران	محمود خسروی
دانشیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران	محمدصادق دهقانپان
استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران	رضا دوستان
استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران	مسعود رحیمی
استادیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران	قاسم عزیزی
استاد گروه برنامه ریزی شهری و منطقه‌ای، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران	علیرضا کربلایی درئی
دانشیار علوم اطلاعات جغرافیایی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران	حسن محمودزاده
استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران	مسعود مینائی
استادیار پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران	اسماعیل نجفی
دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران	محمد سعید نجفی
استاد گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران	سعید نگهبان
استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران	احمد نوحه‌گر
	فریبا همتی

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
۱	شناسایی منشاء گردوغبار با استفاده از تنسور مکانی-زمانی عمق اپتیکی آئروسول در محدوده شهرستان ایلام رامین کرمی؛ حسین اعتمادفر
۱۸	تحلیل اثرات فرآیندهای تکتونیکی بر ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و ارزیابی پتانسیل خطر ناپایداری‌های دامنه‌ای در حوضه آبریز شهرچای ارومیه فریبا همتی؛ صابر سید احمدی؛ اکرم علیزاده
۳۸	مدل سازی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی: مطالعه موردی حوضه آبریز سد شهید عباسپور، شمال شرق خوزستان مهشید معاوی؛ هیوا علمیزاده؛ مژگان انتظاری
۵۵	بررسی ریخت‌زمین‌ساخت و لرزه‌خیزی بخش شمالی و جنوب خاوری ایران مرکزی نجیم اسکندری نصب سیاهکوهی؛ مجید نعمتی؛ شهرام شفیعی بافتی
۷۲	بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی در روند سیلاب حوضه آبریز مردق‌چای با استفاده از مدل SWAT و شبکه عصبی مصنوعی محمدحسین رضائی مقدم؛ عاطفه حقیقت؛ توحید رحیم پور؛ عبدالله بهبودی
۹۳	تحلیل ساختار و تغییر رژیم خشکسالی در ایران با رویکرد خوشه‌بندی سه‌بعدی جواد مهدی زاده سولا؛ یوسف قویدل رحیمی؛ منوچهر فرج زاده
۱۱۶	پیش‌نگری و روندیابی بارش در شهرهای منتخب نیمه شمالی ایران با بهره‌گیری از مدل‌های CNRM و ACCESS رقیه ملکی مرشت؛ برومند صلاحی؛ مهناز صابر
۱۴۰	مشخصات عمومی پدیده رعدوبرق در ایران حمزه علی زاده؛ حسین عساکره؛ کوهزاد رئیس پور
۱۶۶	تحلیل فضایی- زمانی رخداد زلزله در ایران (۱۳۷۵-۱۴۰۳): یک مطالعه آسیب شناسانه با نگاهی به شهرها رویا مقابلی؛ فائزه بهادری؛ علیرضا محمدی
۱۹۰	سدسازی در پرتو جرم‌شناسی سبز: تحلیل محتوای رمان «بعد از ابر» حمیدرضا دانش ناری؛ ابوالفضل شرافتی
۲۱۱	تحلیل عوامل موثر بر آلودگی محیط‌زیست شهری در مناطق ساحلی (بندرانزلی، رضوانشهر و آستارا) با استفاده از مدل‌های (RF و AHP) زهرا پورمقدم؛ مجتبی یمانی؛ منصور جعفر بیگلو
۲۳۵	شناسایی مناطق مستعد دفن زباله بر مبنای پارامترهای محیطی و اعمال مناطق ممنوعه (مطالعه موردی: شهرستان دالاهو) سید اسداله حجازی؛ زهرا زنگنه تبار



بسمه تعالی
توافقنامه همکاری علمی

این توافقنامه فی مابین مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی و انجمن کواترنری ایران و به منظور همکاری در ادامه انتشار نشریه علمی با عنوان جغرافیا و مخاطرات محیطی در زمینه بررسی مخاطرات محیطی منعقد می گردد.
ماده ۱- نشریه به صورت فصلنامه و هر سال چهار شماره به زبان فارسی منتشر می شود. 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 پژوهش های علمی.

ماده ۲- امور علمی نشریه را هیأت تحریریه که حداقل یک چهارم اعضای آن از اعضای انجمن هستند انجام خواهند داد.
تبصره ۱: انجمن متعهد می شود 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 خواهد شد. انتخاب سردبیر و اعضای هیأت تحریریه مطابق با آیین نامه تعیین اعتبار نشریات علمی کشور صورت خواهد پذیرفت.
ماده ۳- دفتر نشریه در موسسه متقاضی نشریه خواهد بود و با مسئولیت مدیر مسئول اداره خواهد شد.

ماده ۴- روی جلد نشریه علاوه بر نشان دانشگاه فردوسی مشهد نشان انجمن کواترنری ایران با اندازه یکسان چاپ خواهد شد.
ماده ۵- در صفحه حقوقی تمامی شماره های نشریه، این جمله آورده شود «این نشریه حاصل فعالیت مشترک دانشگاه فردوسی مشهد و انجمن کواترنری ایران است».

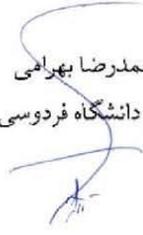
ماده ۶- کلیه هزینه های آماده سازی نشریه اعم از هزینه های داوری، حق الزحمه ویراستار مجری، امور دفتری، پست و مخابرات، تایپ،... برعهده دانشگاه فردوسی مشهد خواهد بود.

ماده ۷- هزینه های 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 خواهد شد.

ماده ۸- هرگاه یکی از طرفین قرارداد مایل به فسخ آن باشد بایستی تصمیم خود را حداقل شش ماه 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.

۹- این قرارداد در ۸ ماده و دو تبصره در دو نسخه به مدت ۴ سال تنظیم گردید و در تاریخ ۱۴۰۰/۱۲/۱۵ توسط دکتر احمدرضا بهرامی به نمایندگی از دانشگاه فردوسی مشهد و دکتر فریبرز قریب (رئیس هیأت مدیره انجمن کواترنری ایران) به امضاء رسید.

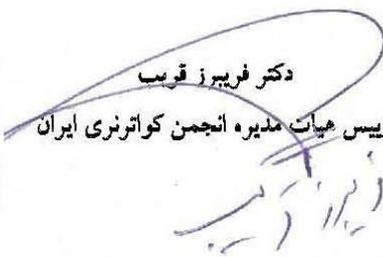
دکتر احمدرضا بهرامی
معاون پژوهشی و فن آوری دانشگاه فردوسی مشهد




معاونت پژوهش و فناوری



دکتر فریبرز قریب
رئیس هیأت مدیره انجمن کواترنری ایران





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: امور علمی نشریه را هیأت تحریریه، که حداقل یک چهارم اعضای آن از بین اعضای انجمن هستند، انجام خواهند داد. تبصره ۱: 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 خواهد شد. 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 خواهد شد.

ماده ۴: روی جلد مجله علاوه بر نشان دانشگاه فردوسی مشهد نشان انجمن ایرانی ژئومورفولوژی با اندازه یکسان نیز چاپ خواهد شد. 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، حق الزحمه 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 خواهد شد.

ماده ۸: هرگاه یکی از طرفین قرارداد مایل به فسخ آن باشد باید تصمیم خود را حداقل شش ماه زودتر کتبا 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.

۹- 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 هیأت مدیره انجمن ایرانی ژئومورفولوژی) به امضاء رسید.

دکتر احمدرضا بهرامی

معاون پژوهشی و فن آوری دانشگاه فردوسی مشهد



دکتر مجتبی یمانی

رییس هیأت مدیره انجمن ایرانی ژئومورفولوژی





Identification of Dust Sources Using Spatio-Temporal Tensor of Aerosol Optical Depth in Ilam County

Ramin Karami ¹, Hossein Etemadfard ^{2*}

¹ M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^{2*} Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 17 June 2023

Revised: 23 August 2023

Accepted: 15 October 2023

Available Online: 21 March 2025

Keywords:

Dust Storms

Aerosol Optical Depth (AOD)

Remote Sensing

Spatio-Temporal Analysis

MODIS

One of the main factors contributing to air pollution is the phenomenon of dust, which causes significant damage to various economic, social, and human resources. Dust events occur in different parts of the world, especially in arid and semi-arid regions, and are driven by both natural and human factors. This research aimed to identify the origin of dust in Ilam city using the spatio-temporal tensor of aerosol optical depth (AOD) derived from MODIS sensor data during the period March–June 2022. First, dusty days were extracted from meteorological data, and the spatio-temporal tensor of aerosol optical depth was generated. The reason for using the tensor was to examine large volumes of data across both spatial and temporal dimensions simultaneously. The results of comparing the tensor with corresponding meteorological data showed that whenever the aerosol optical depth exceeded 0.5, dust events occurred. The spatio-temporal dust tensor analysis revealed that dust levels are directly related to wind speed, and that dust events occur when wind speed exceeds 15 m/s. Finally, by identifying the spatial variations in AOD, four dust sources were detected in the study area (Beld, Mesopotamia, Misan, and Wasit), with Mesopotamia recognized as a major potential source. The analysis of the temporal pattern of AOD indicated an increasing trend in May. The highest AOD value, 3.85 in May, reflected the intensity of dust. Examining the correlation between Ilam dust and the identified sources showed that the regression model for Ilam city was most strongly associated with the Wasit region, with a correlation coefficient of 82.96%.

*Corresponding author: Dr. Hossein Etemadfard

E-mail address: etemadfard@um.ac.ir

How to cite this Article: Etemadfard, H., & Karami, R. (2025). Identification of Dust Sources Using Spatio-Temporal Tensor of Aerosol Optical Depth in Ilam County. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 1-17. <https://doi.org/10.22067/geoeH.2023.82988.1383>



©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

Dust storms are among the most significant atmospheric hazards in arid and semi-arid regions, often causing substantial environmental and socio-economic damage. This phenomenon is particularly prevalent along the global dust belt, stretching from the western coasts of North Africa to the Middle East. Dust particles suspended in the atmosphere may originate from natural sources such as soil erosion and volcanic activity, as well as from anthropogenic pollutants. In western Iran, especially in Ilam Province, dust storms primarily originate in neighboring Iraq. Due to the region's climatic conditions and lack of adequate infrastructure, Ilam is highly vulnerable to frequent and intense dust storm events. Recent research has demonstrated the growing application of remote sensing data and geospatial information systems (GIS) for monitoring and analyzing dust phenomena across Iran. In this context, several studies have focused on the spatial and temporal analysis of dust events in various parts of the country. The present study specifically investigates the spatiotemporal variability of dust storms in Ilam County. Utilizing MODIS satellite imagery and tensor analysis tools within the Google Earth Engine (GEE) platform, this research aims to assess dust distribution patterns over time and space. The findings identify primary dust sources and characterize the temporal evolution and spatial extent of dust activity in the region, resulting in the development of detailed spatiotemporal dust distribution maps for Ilam. This section outlines the study area, datasets, proposed methods, and data preprocessing steps undertaken for the analysis. Ilam County is located in the northwest of Ilam Province, Iran. It is bordered by Eyvan County to the north, Sirvan to the east, Mehran to the south, and Iraq to the west. The region features a temperate mountainous climate, with an average annual precipitation of approximately 619 millimeters and absolute temperature extremes ranging from -13°C to 41°C . Geographically, Ilam County holds strategic significance due to its shared border with Iraq, a primary contributor to dust generation in the Middle East. Given the transboundary nature of dust transport in this region, the spatial extent of the study area was expanded to include zones adjacent to the Iraqi border. This allowed for a more comprehensive analysis of the spatiotemporal distribution of dust storms affecting Ilam.

Material and Methods

Satellite Data and Processing Workflow

This study used satellite data acquired from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor, which is mounted on NASA's Terra and Aqua satellites for global atmospheric monitoring. MODIS features 36 spectral bands with varying spatial resolutions. For the retrieval of dust-related parameters, the Deep Blue (DB) algorithm was employed to extract the Aerosol Optical Depth (AOD) index, which quantifies the concentration of airborne particulate matter. The primary dataset used in this research is the MCD19A2 daily AOD product, originally provided at a spatial resolution of 1 kilometer. For analytical purposes, the data were resampled to a 2-kilometer resolution to optimize computational efficiency. Dust storm days were identified and extracted within the Google Earth Engine (GEE) platform, and further processing and visualization were conducted using MATLAB software.

Google Earth Engine

Google Earth Engine (GEE) is a web-based cloud processing platform launched by Google in 2010, providing free and rapid access to remote sensing data. As one of the largest platforms for spatial data analysis, GEE is widely used in climate studies, meteorology, and remote sensing applications. Its use provides significant time, cost, and human resource savings, as well as enhanced accuracy in studies due to access to up-to-date and comprehensive data repositories.

Tensor Analysis

To simultaneously analyze spatial and temporal phenomena, multidimensional structures are required, which are provided by tensor analysis. In this study, a third-order (three-dimensional) tensor was employed

in the MATLAB environment to model and analyze the data based on geographic latitude, longitude, and time. Unlike traditional statistical methods, the use of tensors enables the examination of complex spatiotemporal phenomena with greater precision and differentiation. Dust storms are not only a nuisance but also have profound environmental and human consequences. Identifying the origins of this phenomenon, particularly in the border regions of western Iran, such as Ilam County, is of critical importance. The majority of these dust storms originate from the deserts of Iraq, Saudi Arabia, and Syria, where poor water management practices and hydraulic construction projects have contributed to land degradation, making it more susceptible to dust production. In this study, we used remote sensing technology and the Google Earth Engine platform to investigate daily dust storm variations during the spring of 2022. Unlike previous studies that primarily focused on periodic or seasonal analyses, we employed daily MODIS satellite data in conjunction with tensor analysis to provide a more precise and visual representation of dust storm events. The tensor-based plots for March revealed two significant dust waves on the 4th and 6th of March, originating from the Wasit region of Iraq, which impacted Ilam County and the Maysan region. The intensity of the first wave was such that horizontal visibility in Ilam dropped to just 800 meters. The second wave, although less intense, was still notably impactful. In April, three distinct dust waves affected Ilam, originating from the Balad and Mesopotamian regions. These storms occasionally reduced horizontal visibility to as low as 500 meters. However, the most severe dust events occurred in May, with five consecutive waves originating from the Al Anbar, Wasit, and Maysan regions. On May 23, visibility in Ilam dropped to zero, marking the worst conditions during the study period. June also saw two waves originating from Balad and Maysan, with visibility in Ilam reduced to 2000 meters. The analysis showed that May recorded the highest Aerosol Optical Depth (AOD) values, indicating the greatest dust density.

Validation of Results

To validate our findings, the AOD data were cross-verified with ground station measurements from the source regions and Ilam. Specifically, a strong correlation was found between AOD variations in the Wasit region of Iraq and Ilam County. Regression modeling confirmed this correlation, indicating that whenever dust storms occur in the Wasit region, Ilam County is likely to be affected as well.

Conclusion

This study, utilizing spatiotemporal tensor analysis, successfully identified the origin and daily pattern of dust storms in Ilam County from March to June 2022. The data used in this research were extracted from the MODIS sensor (MCD19A2 product), and dust storm days were selected based on reports from the Meteorological Organization. A key advantage of applying tensor analysis in this study is its ability to simultaneously represent spatial and temporal variations of dust storms in a three-dimensional space, a feature not available in traditional two-dimensional methods, such as satellite imagery. This approach allowed for a precise examination of the dust storm origins on a daily basis, marking an innovative step in atmospheric monitoring. The results of the analysis revealed that the dust storm situation in the study area was critical. Four major regions were identified as the primary sources of dust: Balad, Mesopotamia, Maysan, and Wasit. Among these sources, the Mesopotamian region played a dominant role, particularly in May, with an AOD index of 3.85, indicating the highest frequency and intensity of dust storms.

Furthermore, correlation matrix analysis showed the most direct and significant relationship between dust storms in Ilam County and the Wasit region of Iraq. This study demonstrated that tensor analysis is a powerful tool for monitoring and forecasting dust storm behavior, offering valuable support for environmental policymakers and disaster management authorities in making informed, scientific decisions. It is recommended that future studies incorporate additional variables such as temperature, vegetation cover, wind patterns, and climate change to develop more comprehensive models for dust storm monitoring.



دسترسی آزاد

نشریه علمی جغرافیا و مخاطرات محیطی

DOI: 10.22067/GEOEH.2023.82988.1383

مقاله پژوهشی



شناسایی منشأ گردوغبار با استفاده از تنسور مکانی - زمانی عمق اپتیکی آئروسول در محدوده شهرستان ایلام

رامین کریمی^۱، حسین اعتمادفر^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم اطلاعات مکانی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^{۲*} استادیار سیستم اطلاعات مکانی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
یکی از عوامل آلودگی هوا پدیده گردوغبار می باشد که باعث خسارات زیادی به منابع اقتصادی، اجتماعی و انسانی مختلف شده است. پدیده گردوغبار در بخش هایی از جهان از جمله مناطق خشک و نیمه خشک رخ می دهد که از عوامل طبیعی و انسانی ناشی می شود. این پژوهش به شناسایی منشأ گردوغبار در محدوده شهرستان ایلام با استفاده از تنسور مکانی - زمانی عمق اپتیکی آئروسول (AOD) با داده های سنجنده مادیس در دوره زمانی ماه های مارس تا ژوئن ۲۰۲۲ پرداخته است. ابتدا از داده های هواشناسی، روزهای پر گردوغبار استخراج شده و تنسور مکانی - زمانی عمق اپتیکی آئروسول تولید شد. دلیل استفاده از تنسور، بررسی تغییرات حجم عمده ای از داده ها به صورت مکانی و زمانی در یک دوره مطالعاتی به طور هم زمان بوده است. نتایج مقایسه تنسور مربوطه با داده های هواشناسی متناظر، نشان داد که هرگاه عمق اپتیکی آئروسول از ۰/۵ بالاتر باشد، گردوغبار در آن محدوده وجود دارد. تحلیل تنسور مکانی - زمانی گردوغبار نشان داد که میزان گردوغبار با سرعت باد ارتباط مستقیم دارد و هرگاه سرعت باد از ۱۵ متر بر ثانیه عبور کند، گردوغبار رخ می دهد. در نهایت با شناسایی تغییرات مکانی AOD چهار منبع گردوغبار (بلد، بین النهرین، میسان و واسط) در محدوده مطالعاتی وجود دارد که بین النهرین به عنوان یکی از مناطق بالقوه گردوغبار شناسایی شد. تحلیل الگوی زمانی AOD حاکی از روند افزایشی آن در ماه می، است. بیشترین مقدار AOD با ۳/۸۵ در ماه می، نشان دهنده میزان گردوغبار زیادی است. با بررسی همبستگی بین گردوغبار ایلام و مراکز شناسایی شده، مدل رگرسیونی شهرستان ایلام ارتباط بیشتری با منطقه واسط دارد و ضریب همبستگی آن ۸۲/۹۶ درصد است.	<p>تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۳</p> <p>کلمات کلیدی: طوفان های گردوغبار عمق نوری آئروسول AOD سنجش از دور تحلیل فضایی-زمانی مادیس</p>

مقدمه

یکی از مخاطرات جوی، ذرات ریزگردها هستند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان رخ می‌دهند (Goudarzi, Shirmardi, Naimabadi, Ghadiri & Sajedifar, 2019; Middleton, 2017; Rezaei Moghaddam, Sedighi, Fasihi & Karimi Firozjahi, 2018). به ذرات معلق به قطر ۱۲ میکرون یا بیشتر، ریزگرد گویند (Chung, Kim, Jugder, Natsagdorj & Chen, 2003). مهم‌ترین مناطق مستعد این رخداد در کمربند جهانی ریزگرد از سواحل غربی شمال آفریقا تا خاورمیانه گسترش یافته است (Formenti et al., 2011; Shi, Zhang, Yao, Zhang & Guo, 2021). ریزگردها باعث خسارات زیادی از جمله آسیب رساندن به محصولات کشاورزی، کاهش دید افقی، آسیب رساندن به حمل‌ونقل زمینی و هوایی و مهاجرت افراد به سایر نقاط کشور شده است (Lee, Kim, Honda, Lim & Yi, 2013). با توجه به مطالعات انجام شده، طوفان ریزگرد در غرب ایران، بیشتر از عراق و سوریه و کمتر از کشورهای عربستان و کویت سرچشمه می‌گیرد (Ashrafi, Shafiepour-Motlagh, Aslemand & Ghader, 2014; Taghavi, Owlad & Ackerman, 2017). ذرات ریزگرد از انواع مختلف ذرات معلق در هوا شامل گردوغبار، خاکستر آتشفشان‌ها و آلاینده‌های انسانی (سوزاندن سوخت فسیلی) تشکیل شده‌اند که تمرکز این پژوهش بر روی بررسی گردوغبار است.

سازمان جهانی هواشناسی (WMO: World Meteorological Organization) وقوع گردوغبار را نتیجه آشفتگی جریان جوی به اتمسفر معرفی می‌کند و در صورتی که دید افقی به کمتر از هزار متر برسد و همچنین سرعت باد از ۱۵ متر بر ثانیه تجاوز کند پدیده گردوغبار رخ خواهد داد (Al-Hemoud et al., 2019). پدیده گردوغبار با وزش بادهای شدید در مناطق بیابانی تشدید می‌شود. این پدیده در کشورهای غربی ایران (عراق) با هدایت گرمای شدید هوا و الگوهای همدیدی غرب و جنوب غرب ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به دلیل فقدان زیرساخت‌های کافی در کشور عراق در زمینه‌های مدیریت بحران‌های زیست محیطی و مخاطرات طبیعی و همچنین وجود مرز مشترک بین استان ایلام با کشور عراق، استان ایلام متأثر از گردوغبارهای ناشی از آن منطقه می‌باشد (Goodarzi, Hoseini & Ahmadi, 2018).

تحقیقات متعددی در زمینه مطالعه پدیده گردوغبار از نظر کمی و کیفی انجام شده است. درصد بالایی از مطالعات پیشین به وسیله قابلیت‌های سنجش‌ازدور، سیستم اطلاعات مکانی و ایستگاه هواشناسی برای بررسی و تشخیص گردوغبار استفاده کرده‌اند. گروهی دیگر نیز سعی در تهیه نقشه پهنه‌بندی گردوغبار در مناطق مختلف کشور داشتند که این بررسی‌ها به صورت فصلی و دوره‌ای صورت گرفته است (Azimzadeh, Montazerghaem, Torabi Mirzaei & Tajamlan, 2010; Abedzadeh, 2005).

محمدی و زرگری (Mohammadi & Zargari, 2014) در استان تهران به تحلیل مکان - زمان گردوغبار پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد ایستگاه ابعلی با تعداد ۱۰۹ روز در سال دارای بیشترین تعداد روزهای دارای گردوغبار است. همچنین گودرزی و همکاران (Goodarzi et al., 2018) توزیع زمانی و مکانی روزهای همراه با گردوغبار را در غرب و جنوب غرب ایران و در سطح ایستگاه‌های هواشناسی واقع در سه استان ایلام، خوزستان و کرمانشاه مورد بررسی قرار دادند. چمن‌پیرا و همکاران (Chamanpira, Karimi, Sangchini & Norouzi, 2021) به تحلیل زمانی و مکانی گردوغبار جهت کنترل ریسک، در راستای آمایش و توسعه پایدار در یک دوره زمانی ۱۷ ساله از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ پرداختند و نتایج آن نشان داد که ایستگاه خرم‌آباد با فراوانی ۴۵ روز در سال بیشترین تعداد روزهای گردوغبار را در کل استان دارد.

کیم (Kim, 2008) منشاء طوفان‌های گردوغبار آسیایی را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در کره جنوبی بررسی نمود و نتایج آن نشان داد که ۸۷ درصد از رخدادهای ریزگرد در فصل بهار بوده است. علم و همکاران (Alam, Qureshi & Blaschke, 2011) از حسگرهای Modis, Toms, Misr برای بررسی تغییرات فضایی در چندین شهر پاکستان استفاده کردند که نتایج نشان داد در فصل‌های زمستان و تابستان بیشترین مقدار گردوغبار را دارند. استفانیسکی و همکاران (Schepanski, Tegen & Macke, 2012) در پژوهشی در جنوب صحرای آفریقا نشان دادند که زمان شروع یک پدیده گردوغبار در توزیع مکانی آن نقش به‌سزایی دارد. نامداری و همکاران (Namdari, Valizade, Rasuly & Sari Sarraf, 2016) با استفاده از میانگین ماهانه عمق اپتیکی گردوغبار (AOD) به

بررسی و توزیع زمانی و مکانی گردوغبار در بخش‌های غربی طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد در بیشتر سال‌ها، جولای، بیشترین میانگین AOD را دارد.

نامداری و همکاران (Namdari, Karimi, Sorooshian, Mohammadi & Sehatkashani, 2018) رابطه بین غلظت گردوغبار، بارش و دما را در خاورمیانه با استفاده از سنجنده مادیس و ایستگاه‌های سینوپتیک بررسی کردند. کین و همکاران (Qin et al., 2018) تغییرات مکان - زمان AOD در چین با استفاده از سنجنده Merra, Modis از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۷ ارزیابی کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که AOD در حال افزایش است. کرمی و همکاران (Karami, Hossein Hamzeh, Alam, Noori & Ranjbar Saadat, 2021) گردوغبار را در سه جزیره ایران شامل قشم، کیش و خارک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در یک بازه ده‌ساله بررسی کردند که نتایج نشان داد بیشترین مقدار AOD در ماه جولای اتفاق افتاده است.

در سال‌های گذشته، گردوغبار به صورت محلی از ایستگاه‌های زمینی که فقط بخش کوچکی را پوشش می‌دهند، پایش شده است؛ اما امروزه از تصاویر ماهواره‌ای برای ارزیابی گردوغبار به صورت مکانی و زمانی استفاده می‌شود.

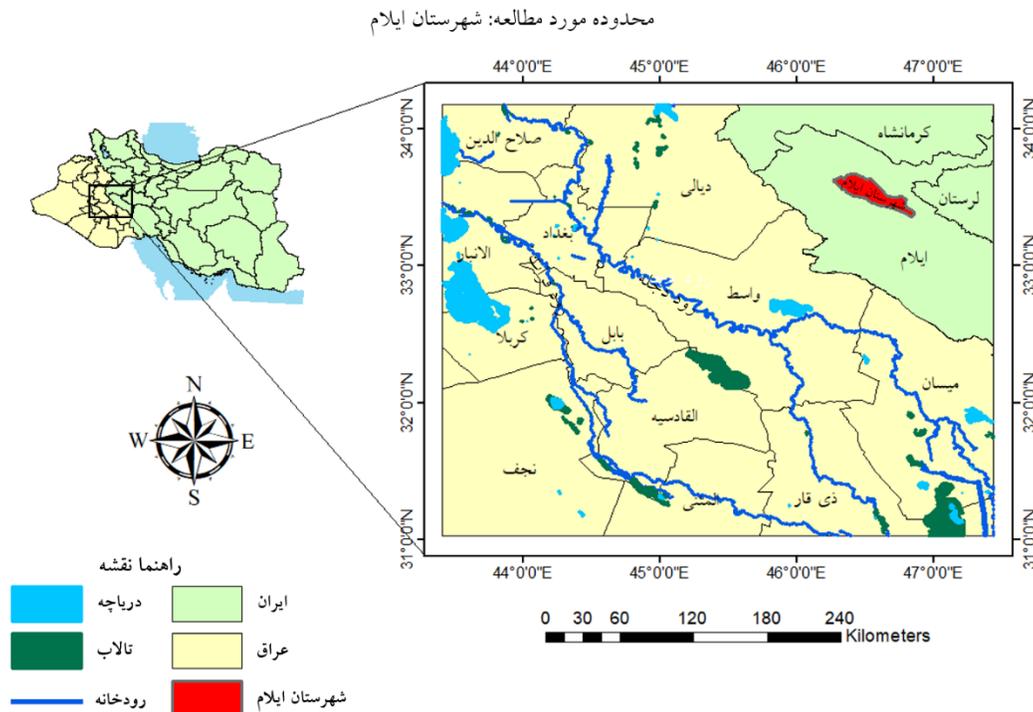
این پژوهش به شناسایی و بررسی روند تغییرات گردوغبار در شهرستان ایلام پرداخته است. ایلام در غرب کشور و هم مرز با کشور عراق است که این کشور به عنوان منشاء گردوغبار شناخته می‌شود. به همین دلیل بررسی تغییرات گردوغبار در این شهرستان امری ضروری است. در پژوهش‌های پیشین جهت بررسی پدیده گردوغبار از ایستگاه‌های هواشناسی و تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است. اما در پژوهش حاضر به بررسی روند تغییرات مکانی - زمانی گردوغبار در شهرستان ایلام با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین (GEE) و داده‌های سنجنده مادیس (شاخص AOD) با استفاده از ابزار تنسور، پرداخته شده است. در مطالعات صورت گرفته جهت شناسایی منابع گردوغبار با استفاده از مجموعه داده‌های هواشناسی و تصاویر ماهواره‌ای و رویکردها، هیچ نقشه جامعی از منابع گردوغبار در غرب کشور (شهرستان ایلام) با استفاده از تنسور وجود ندارد. به همین دلیل در این پژوهش از تنسور جهت نمایش هم‌زمان تغییرات مکانی - زمانی گردوغبار استفاده شده است. در این پژوهش روزهای دارای گردوغبار بر اساس آمار اخذ شده از سازمان هواشناسی استان ایلام، مشخص گردید، سپس با استفاده از تنسور منشاء و تغییرات مکانی - زمانی آن طی بازه‌های زمانی مختلف از ماه مارس تا ژوئن ۲۰۲۲ مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

در این بخش، محدوده مطالعاتی، داده‌های مورد استفاده در این مطالعه، روش‌های پیشنهادی و نیز نحوه آماده‌سازی داده‌ها جهت استفاده، مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

منطقه مورد مطالعه

شهرستان ایلام در شمال غربی استان ایلام قرار دارد که از شمال به شهرستان ایوان، از شرق به سیروان، از جنوب به مهران و از غرب به کشور عراق، محدود می‌شود که در 33° و $38'$ عرض شمالی و 46° و $25'$ طول شرقی، در ارتفاع ۱۴۴۰ متری از سطح دریا واقع شده است. شهر ایلام با این که در دشت ایلام قرار گرفته، از جمیع جهات به وسیله کوه‌های منفرد و ارتفاعات جنگلی احاطه شده است که دارای آب‌وهوای معتدل کوهستانی با میانگین بارش سالیانه $619/5$ میلی‌متر و متوسط دمای مطلق آن از $13/6$ - تا $41/2$ درجه سانتی‌گراد در تغییر است. وسعت این شهرستان 2158 کیلومترمربع و جمعیت این شهر که در 1335 شمسی، 8346 نفر بود، در 1395 شمسی، به 224590 نفر افزایش یافت. در حال حاضر شهرستان ایلام به عنوان مرکز سیاسی - اداری استان ایلام شناخته شده است و از آنجا که هم‌مرز کشور عراق می‌باشد از اهمیت بالایی برای شناسایی و بررسی منشاء گردوغبار برخوردار است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- محدوده مطالعاتی پژوهش شهرستان ایلام

Fig. 1. Research Study Area: Ilam County

همانطور که در شکل ۱ نمایش داده شده است، استان ایلام هم‌مرز با کشور عراق و نزدیک به کشورهای عربستان و کویت می‌باشد که این کشورها منابع اصلی گردوغبار در خاورمیانه هستند. از آنجایی که بیشتر طوفان‌های گردوغبار شهرستان ایلام در مرز استان ایلام قرار دارد (Goudie & Middleton, 2001; Shahsavani et al., 2012; Draxler, Gillette, Kirkpatrick & Heller, 2001)، به همین دلیل برای تحلیل مکانی - زمانی گردوغبار، وسعت منطقه مطالعاتی تا کشور عراق گسترش داده شد.

داده‌ها

در پژوهش حاضر از داده‌های ماهواره‌ای مربوط به سنجنده مادیس (Modis) استفاده شده است که بر روی دو ماهواره ترا در سال ۱۹۹۹ و اکوا در سال ۲۰۰۲ برای پیش‌ویژگی اتمسفر در مقیاس جهانی طراحی شده است. محصولات این سنجنده از ۳۶ باند طیفی، با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ متر تشکیل شده است (Remer, Tanré, Kaufman, Levy & Mattoo, 2006). برای بازیابی گردوغبار، سنجنده مادیس از دو الگوریتم دارک تارگت (DT) و آبی عمیق (DB) استفاده می‌کند که در این تحقیق از الگوریتم DB برای بازیابی مقدار AOD استفاده شده است. شاخص AOD یک پارامتر بدون بُعد است که تراکم ذرات معلق در هوا را مشخص می‌کند؛ به صورتی که هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد، نور خورشید به میزان کمتری به زمین خواهد رسید (Stafoggia et al., 2019; Lyapustin, Wang, Korkin & Huang, 2018). برای پردازش داده‌های مادیس از محصولات توسعه داده شده MCD19A2 (به صورت روزانه و با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر) استفاده شده است (Wang, Zhou & Dong, 2006) و به منظور کاهش حجم داده‌ها برای پردازش و تحلیل، در این تحقیق از شاخص AOD سنجنده مادیس که قدرت تفکیک مکانی آن به دو کیلومتر تبدیل شده است، استفاده شد. در واقع روش کلی این تحقیق بدین صورت است که بعد از شناسایی روزهای گردوغبار در

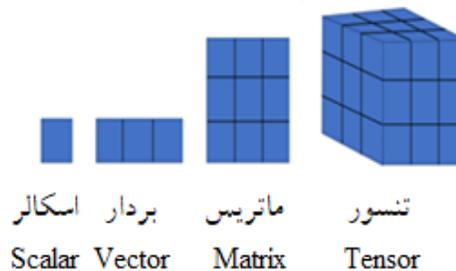
سامانه گوگل ارث انجین، تصاویر (شاخص AOD) از سنجنده مادیس اخذ شد و در محیط برنامه‌نویسی متلب مورد پردازش قرار گرفت و نمایش داده شد.

گوگل ارث انجین

گوگل ارث انجین یک سکوی ابری مبتنی بر وب می‌باشد که در سال ۲۰۱۰ توسط گوگل راه‌اندازی شده است که به صورت متن‌باز از محاسبات گوگل استفاده می‌کند (Gorelick et al., 2017; Soleimany, Grubliauskas & Šerevičienė, 2021). این سامانه یکی از بزرگ‌ترین سکوهای پردازش داده‌های سنجش‌ازدور است که به کاربران در دسترسی رایگان به داده‌ها کمک می‌کند (Amani et al., 2020). همچنین این سامانه یک بستر محاسباتی برای پردازش داده‌های بزرگ در مقیاس جهانی می‌باشد. سامانه مذکور برای دریافت اطلاعات و داده، جهت بررسی موضوعات مختلف در زمینه‌های اقلیمی، آب‌وهواشناسی و به‌طور کلی سنجش‌ازدور به کار می‌رود. استفاده از این سامانه باعث کاهش زمان پردازش داده‌ها و بهبود دقت مطالعات (به دلیل به‌روز بودن پایگاه داده) شده و در کل، باعث صرفه‌جویی در زمان، هزینه و نیروی انسانی می‌شود.

تنسور

تحلیل‌های مکانی و زمانی یک پدیده بر اساس موقعیت جغرافیایی و زمان (اعم از تاریخ و ساعت) آن بررسی می‌شود. این‌گونه تحلیل‌ها همواره نیازمند نمایش موقعیت آن پدیده است که متناسب با رفتار آن پدیده در یک، دو و سه بُعد (طول، عرض و ارتفاع) بیان می‌گردد و بررسی یک پدیده در طول زمان نیز نیازمند نمایش یک بُعد دیگر است. به همین دلیل آنالیزها در تحقیقات پیشین؛ مانند تحلیل‌های آماری، امکان بررسی یک پدیده را به‌صورت توأمان، در طول مکان و زمان میسر نمی‌کند. عناصر مختلف مکان - زمان در تجزیه و تحلیل پدیده‌های مکانی پیچیده و دشوار است (Li et al., 2020) و مستلزم توسعه ساختار چندبُعدی است که استفاده از تنسور این امکان را فراهم می‌کند. در تعاریف پایه، مربوط به تنسور، تنسور مرتبه صفر، اول و دوم را به ترتیب اسکالر، بردار و ماتریس می‌شناسند و تنسور مرتبه سوم در این تحقیق با عنوان تنسور نامیده می‌شود که در شکل ۲ فرم نمایشی آنها آورده شده است.



شکل ۲- نمایش ابعاد مختلف جهت ذخیره‌سازی اطلاعات

Fig. 2. Display of different dimensions for storing information

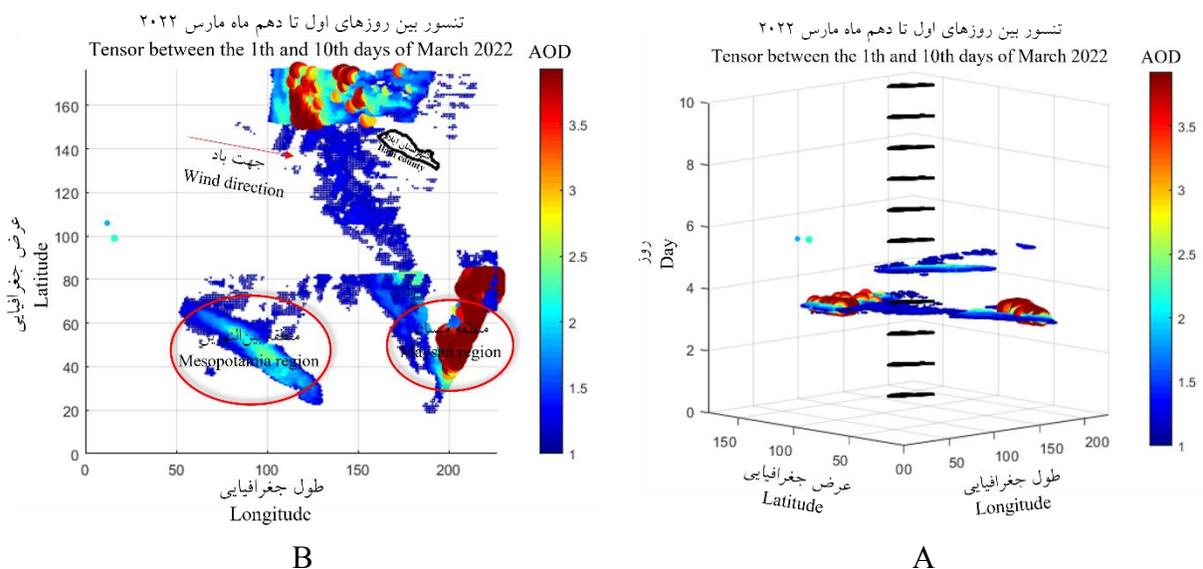
در شکل ۲ اسکالر، بردار، ماتریس و تنسور به ترتیب جهت ذخیره‌سازی اطلاعات در تنسور مرتبه صفر، تنسور مرتبه یک، تنسور مرتبه دو و در تنسور مرتبه سه را تشکیل می‌دهد (Golmohammadi, Etemadfrad & Kharaghani, 2023). در این پژوهش از تنسور مرتبه سه (در محیط برنامه‌نویسی متلب) استفاده شده است. همانطور که اشاره شد با بررسی مطالعات مکان - زمان و با افزایش مؤلفه‌های آن، تنسور این امکان را با افزایش ابعاد میسر می‌کند. همچنین با استفاده از تنسور می‌توان بین پدیده‌ها تمایز قائل شد به‌نحوی که دو عارضه متفاوت با طول و عرض جغرافیایی یکسان و ارتفاع متفاوت را بررسی نمود.

نتایج و بحث

پیاپی سازی و ارزیابی نتایج عددی

گردوغبار پیامدهای نامطلوب بسیاری به همراه دارد، به همین دلیل شناسایی منابع گردوغبار و تأثیر آن بر زندگی انسان و محیط زیست در مناطق مختلف کشور امری ضروری است.

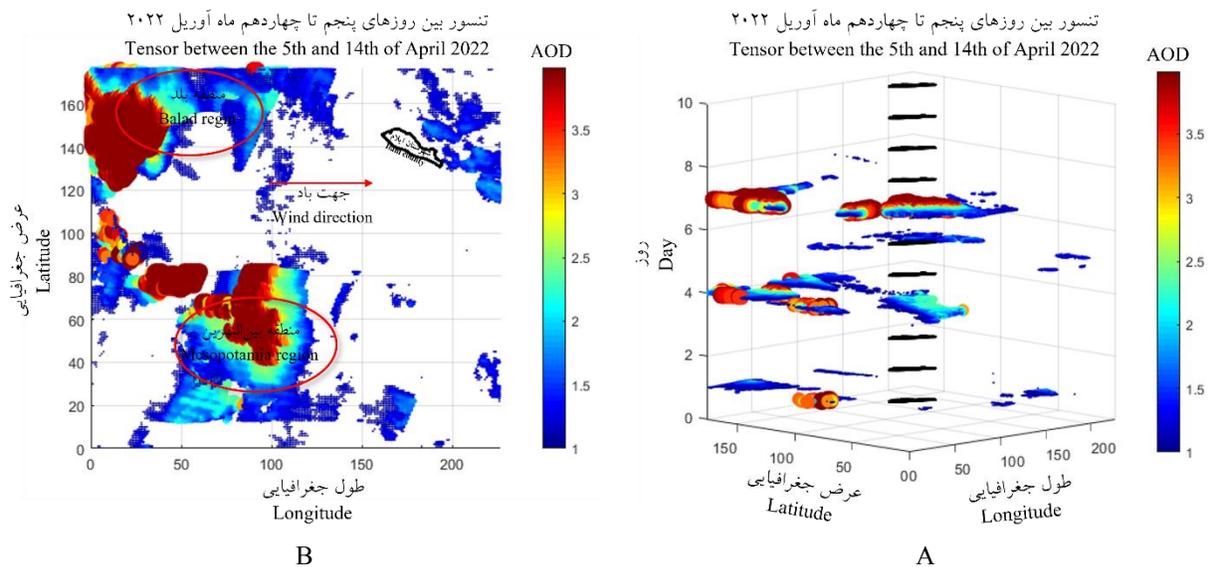
بررسی بسیاری از محققان نشان می‌دهد که گردوغبار مؤثر بر غرب کشور از خاورمیانه و کشورهای (عراق، عربستان، سوریه) سرچشمه می‌گیرد (Soleimany, Solgi, Ashrafi, Jafari & Grubliauskas, 2022). در کشور عراق ساخت سازه‌های هیدرولیکی و عدم مدیریت منابع آبی (Hamidi, Kavianpour & Shao, 2013) منجر به افزایش دشت‌های آبرفتی و سیلابی در نواحی بین‌النهرین (دو رودخانه دجله و فرات) که نقش مهمی در انتشار گردوغبار دارند، شده است (Mianabadi & Amini, 2019; Khalid, 2020). توزیع مکانی و شرایط پوشش اراضی منابع گردوغبار نشان‌دهنده این است که ستون گردوغبار از منابع خاصی منشاء می‌گیرد. پژوهش‌هایی که در گذشته انجام شده است به صورت موردی با تحلیل‌های آماری و تصاویر ماهواره‌ای انجام شده است، که روش‌های سنجش‌از دور به عنوان جایگزین مناسبی جهت بررسی تغییرات گردوغبار است (Yu, Kalashnikova, Garay, Lee & Notaro, 2018). در بررسی‌های گذشته از قابلیت سنجش‌از دور با گوگل ارث انجین در بررسی تغییرات، به صورت میانگین فصلی و دوره‌ای استفاده شده است (Ali Bakhshi, Azizi, Vafaiejad & Aghamohammadi Zanjirabadi, 2020). اما در پژوهش حاضر تغییرات به صورت روزانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در اینجا با استفاده از داده‌های روزانه، سنجنده مادیس به عنوان یک تصویر در طی دوره زمانی از ماه مارس تا ژوئن، به تحلیل و بررسی تغییرات مکانی-زمانی گردوغبار با استفاده از تانسور پرداخته شد. مزیت استفاده از تانسور، در این پژوهش، بررسی و تحلیل مکانی-زمانی و تغییرات روزانه گردوغبار در منطقه مطالعاتی می‌باشد. شکل ۳ نمایش تانسور بین روزهای اول تا دهم ماه مارس در سال ۲۰۲۲ می‌باشد. هر کدام از تصاویر لایه‌ها در تانسور نشان‌دهنده یک روز در بازه زمانی مورد نظر است (هر تصویر از زمان آغاز بازه زمانی نشان‌دهنده یک روز یا یک لایه می‌باشد). برای درک بهتر تانسورها، مناطق با رنگ قرمز منشاء گردوغبار را نشان می‌دهند.



شکل ۳- تانسور بین روزهای ۲۰۲۲/۰۳/۰۱ تا ۲۰۲۲/۰۳/۱۰ (A) نمایش تانسور از سمت کنار، (B): نمایش تانسور از سمت بالا

Fig. 3. Tensor between 2022.03.01 and 2022.03.10, A) Tensor view from the side, B): Tensor view from the top

در شکل ۳ مشاهده می‌شود که دو موج گردوغبار، شهرستان ایلام را تحت‌تأثیر قرار داده است. موج اول در تاریخ ۴ مارس در شرایطی رخ داده است که طبق گزارش اداره هواشناسی، دید افقی (فاصله ایست که یک شیء یا نور می‌تواند تشخیص داده شود) در این روز ۸۰۰ متر در شهرستان ایلام گزارش شده است و جهت باد غالب در این روز غربی بوده است. این موج از نواحی مرزی (بیابان‌های استان واسط عراق و شهرستان مهران)، واقع در شمال غربی ایلام در شهرستان قصرشیرین استان کرمانشاه مشاهده می‌شود. همچنین در جنوب شرقی منطقه مطالعاتی (منطقه میسان) هم، منبع ریزگرد مشاهده می‌شود. موج دوم در تاریخ ۶ مارس از بین‌النهرین اتفاق افتاده است که با توجه به هوای ابری و بارانی ایلام با شدت کمی مشاهده شده است. دید افقی ۷۰۰۰ متر و جهت وزش باد غربی بوده است. شکل ۴ نمایش تنسور بین روزهای پنجم تا چهاردهم ماه آوریل در سال ۲۰۲۲ می‌باشد.



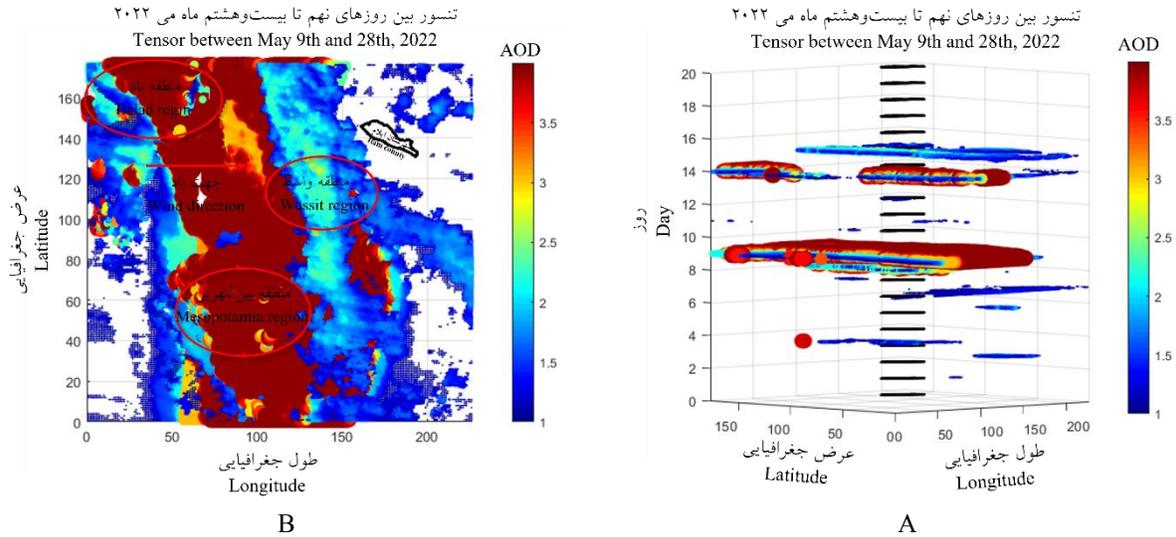
شکل ۴- تنسور بین روزهای ۲۰۲۲/۰۴/۰۵ تا ۲۰۲۲/۰۴/۱۴، (A): نمایش تنسور از سمت کنار، (B): نمایش تنسور از سمت بالا

Fig. 4. Tensor between 2022.04.05 and 2022.04.14, A): Tensor view from the side, B): Tensor view from the top

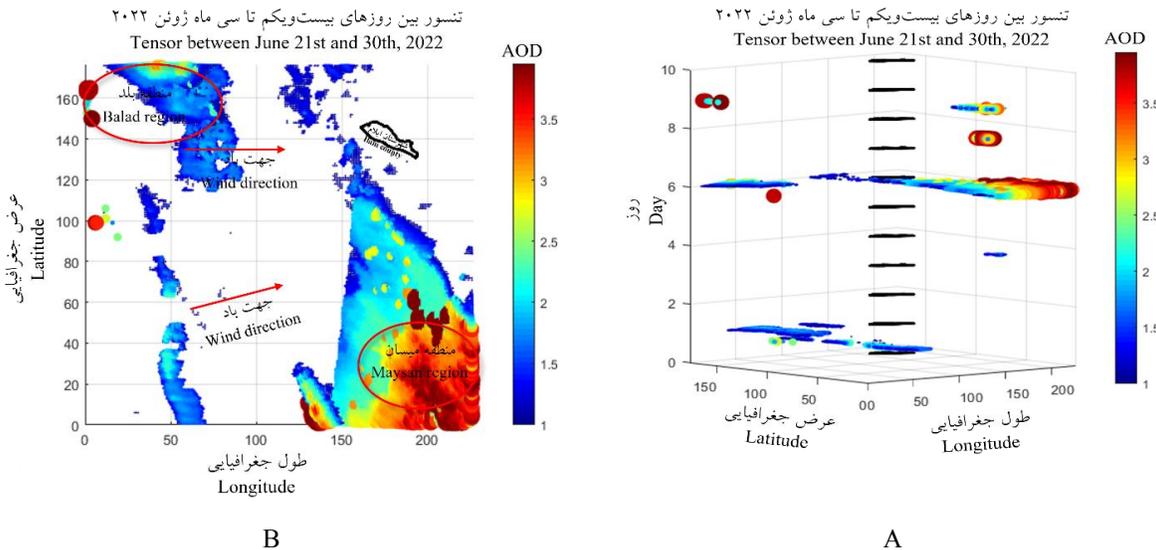
در شکل ۴ مشاهده می‌شود که سه موج گردوغبار در تاریخ‌های مختلف شهرستان ایلام را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. موج اول در تاریخ ۶ آوریل از قسمت غربی منطقه شروع شده است و با توجه به جهت باد غربی در روز ۷ آوریل در ایلام با دید افقی ۶۰۰۰ مشاهده شده است. موج دوم در تاریخ ۹ آوریل از بیابان‌های بین‌النهرین و همچنین در بیابان‌های منطقه بلد در شمال غربی بغداد به‌عنوان منابع گردوغبار شناسایی شده‌اند. دید افقی در ۹ و ۱۰ آوریل به ۵۰۰ متر رسیده است. موج سوم در ۱۲ آوریل از بین‌النهرین و بلد به‌عنوان منبع گردوغبار شناسایی شده است. دید افقی در این روز در شهرستان ایلام ۲۰۰۰ متر گزارش شده است. شکل ۵ نمایش تنسور بین روزهای نهم تا بیست و هشتم ماه می در سال ۲۰۲۲ می‌باشد. در این تنسور شاهد افزایش روزهای گردوغبار و کاهش میزان دید به پایین‌ترین سطح در تاریخ ۲۳ می، است.

در شکل ۵ همان‌طور که مشاهده می‌شود ۵ موج گردوغبار، منطقه مورد مطالعه را تحت‌تأثیر قرار داده است. موج اول در تاریخ ۱۰ می، از بیابان‌های الانبار شروع شده و در تاریخ ۱۱ می، در ایلام با دید افقی ۱۵۰۰ متر و جهت غالب باد از غرب مشاهده شده است. موج دوم در تاریخ ۱۶ می، از بین‌النهرین و حوالی مرز ایران در بیابان‌های استان واسط عراق با دید افقی ۲۰۰ متر و جهت باد از غرب شروع شده و به مدت دو روز در شهرستان ایلام ماندگار بوده است که روز دوم دید افقی ۵۰۰ متر است. موج سوم در تاریخ ۱۸ می، از بیابان‌های بین‌النهرین و بلد شروع شده که به استناد گزارش هواشناسی ایلام دید افقی در این روز ۶۰۰۰ متر و جهت باد از غرب و شمال غربی بوده است و شهرستان ایلام زیاد تحت‌تأثیر این موج قرار نگرفته است. موج چهارم در منطقه

بین‌النهرین از تاریخ ۲۰ می، شروع شده است و در روز ۲۱ می، در ایلام با دید افقی ۷۰۰ متر و جهت باد از غرب گزارش شده است. موج پنجم در تاریخ ۲۳ می، از بین‌النهرین شروع شده است و به مدت دو روز در منطقه پایدار بوده است. بر اساس گزارش هواشناسی ایلام در روز اول دید افقی صفر و روز دوم دید افقی ۱۰۰ متر گزارش شده است و در روزهای بعدی از شدت آن کاسته شده است. شکل ۶ نمایش تانسور بین روزهای بیست و یکم و یکم تا سی ماه ژوئن در سال ۲۰۲۲ می‌باشد.



شکل ۵- تانسور بین روزهای ۲۰۲۲/۰۵/۰۹ تا ۲۰۲۲/۰۵/۲۸، A): نمایش تانسور از سمت کنار، B): نمایش تانسور از سمت بالا
Fig. 5. Tensor between 2022.05.09 and 2022.05.28, A): Tensor view from the side, B): Tensor view from the top

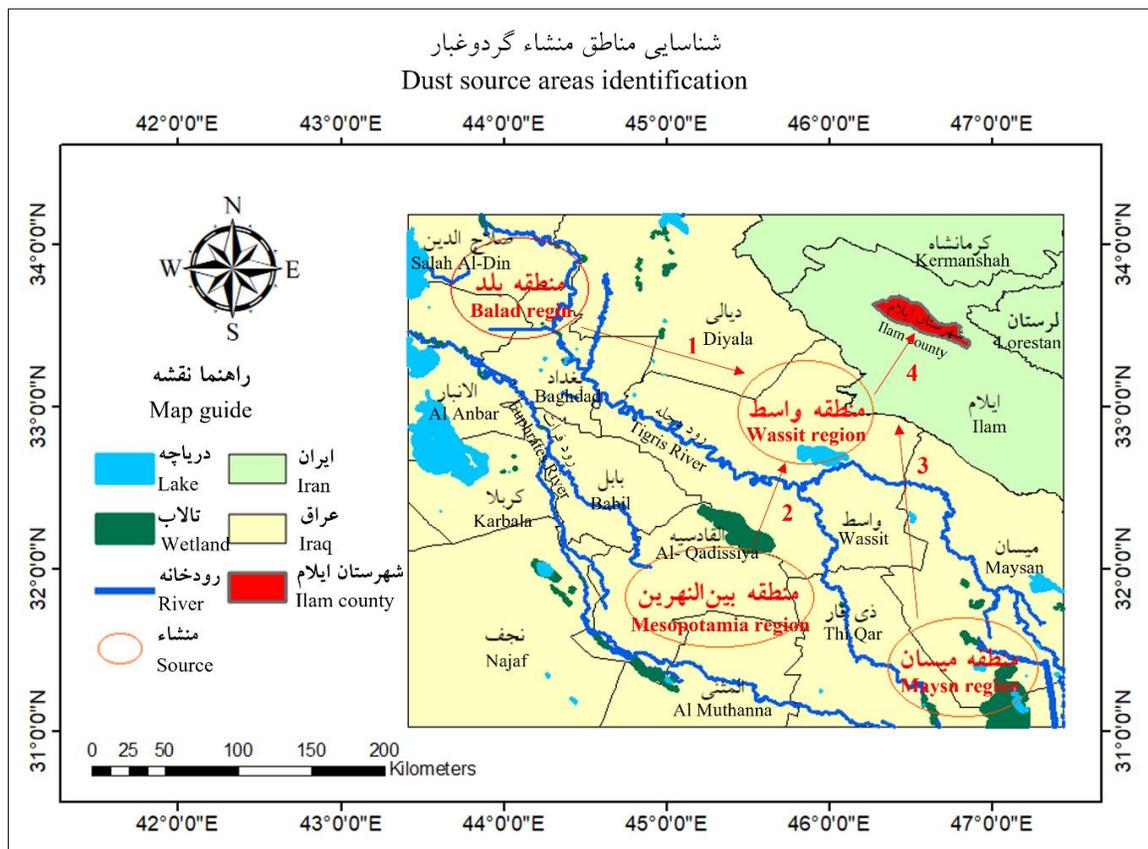


شکل ۶- تانسور بین روزهای ۲۰۲۲/۰۶/۲۱ تا ۲۰۲۲/۰۶/۳۰، A): نمایش تانسور از سمت کنار، B): نمایش تانسور از سمت بالا
Fig. 6. Tensor between 2022.06.21 and 2022.06.30, A): Tensor view from the side, B): Tensor view from the top

همچنان که از شکل ۶ مشخص است در روز ۲۲ ژوئن از منطقه بلد شروع شده است. موج دوم آن در ۲۶ ژوئن از منطقه میسان شروع شده که دید افقی در شهر ایلام به ۲۰۰۰ متر کاهش یافته است. با توجه به شکل‌های بررسی شده ماه می بیشترین مقدار AOD را نشان می‌دهد.

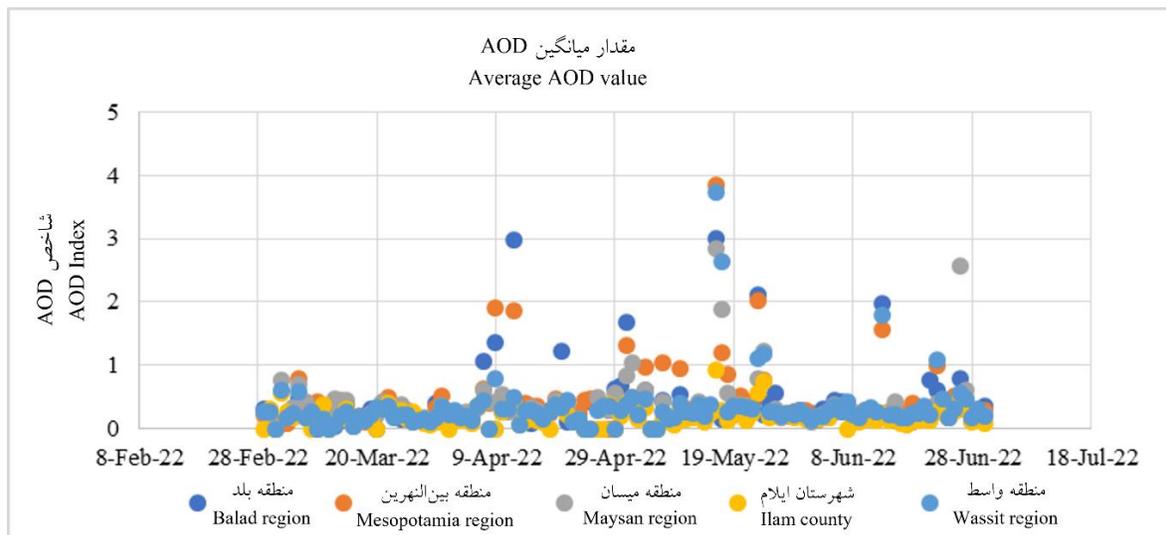
با توجه به نتایج، منطقه بین‌النهرین به‌عنوان یکی از مناطق بالقوه گردوغبار شناسایی شد. در بازه زمانی مورد مطالعه، هرگاه در مناطق مختلف کشور عراق، سوریه و عربستان گردوغبار اتفاق افتاده است، در اواخر همان روز یا روز بعد بسته به سرعت و جهت باد، این پدیده با شدت‌های مختلف در شهرستان ایلام مشاهده شده است. شکل ۷، مناطق مشخص شده در محدوده مطالعاتی منشاء گردوغبار را نشان می‌دهند. همچنین جهت‌های مشخص شده، جهت حرکت گردوغبار را در مناطق منشاء مشخص می‌نمایند.

شکل ۷، موقعیت جغرافیایی منشاء گردوغبار را در محدوده مطالعاتی، مشخص می‌کند. همان‌طور که قابل مشاهده است، مناطق منشاء در کنار تالاب‌ها و دریاچه‌های خشک شده قرار دارند و به همین دلیل است که بین‌النهرین، از مناطق بالقوه گردوغبار است. به‌منظور اعتبارسنجی نتایج با دسته مشاهده مستقل از داده‌های ماهواره‌ای، گزارش میانگین روزانه AOD ایستگاه‌های زمینی در نزدیکی مناطق منشاء و شهرستان ایلام مورد توجه قرار گرفت. شکل ۸، مقدار میانگین روزانه AOD در مناطق منشاء گردوغبار و ایلام را نشان می‌دهد.



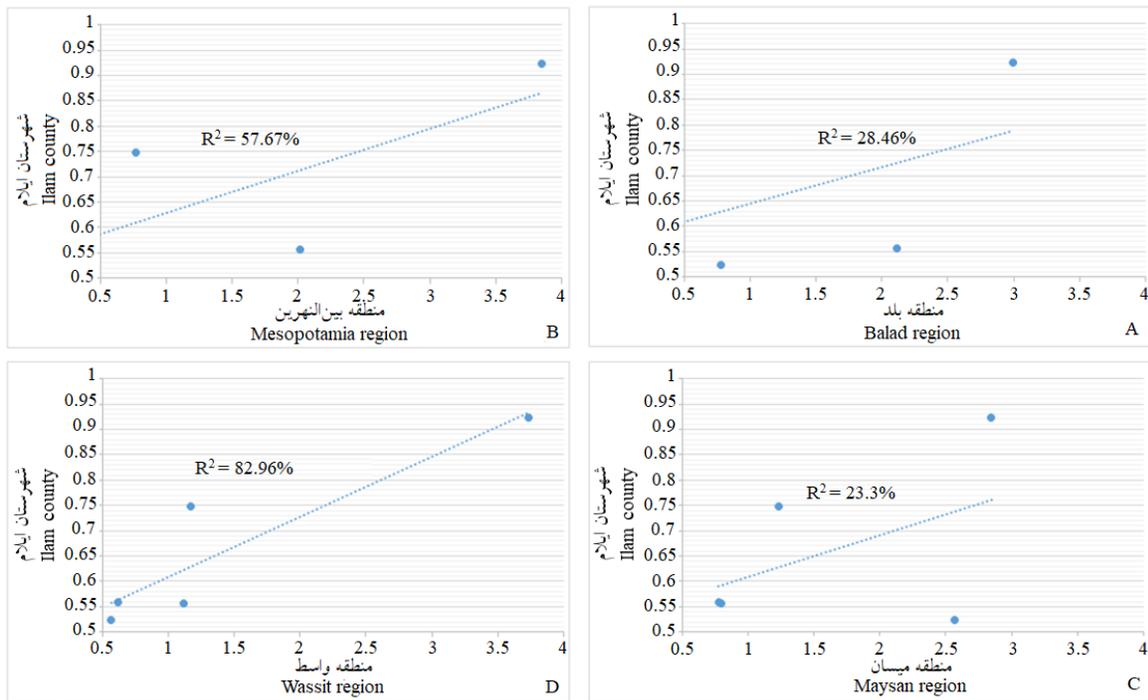
شکل ۷- مناطق منشاء گردوغبار در محدوده مطالعاتی

Fig. 7. Dust source areas in the study area



شکل ۸- مقدار میانگین روزانه AOD مناطق منشأ گردوغبار و شهرستان ایلام
Fig. 8. Daily average AOD value of dust source areas and Ilam county

در شکل ۸، سری زمانی تغییرات گردوغبار در مناطق منشأ و شهرستان ایلام را در سال ۲۰۲۲ به صورت میانگین روزانه نمایش داده است. در ماه آوریل، گردوغبار در مناطق بلد و بین‌النهرین افزایش چشم‌گیری داشته که چندان منجر به آلودگی هوای ایلام نشده است. در ماه می، بیشترین افزایش گردوغبار رخ داده است که علاوه بر دو منطقه فوق، منطقه میسان نیز افزایش بسیار چشم‌گیری داشته است. در همان بازه زمانی افزایش شاخص AOD در شهرستان ایلام مشاهده شده است که به نوعی مؤید نتایج حاصل از تصاویر ماهواره‌ای است. به منظور تخمین مدلی رگرسیونی از مقدار AOD محتمل در شهرستان ایلام، رابطه‌ای بین AOD مشاهده شده در منشأها با همان شاخص در شهرستان ایلام برآورد شده است. شکل ۹، مقایسه این مدل رگرسیونی را نشان می‌دهد. به منظور تولید این نمودار فقط داده‌هایی با AOD بیش از ۰/۵ که در شهرستان ایلام که مبین گردوغبار هستند در مدل‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۹، با مقایسه مقدار AOD شهرستان ایلام با مناطق منشأ گردوغبار (منطقه میسان، واسط، بلد و بین‌النهرین)، همگرایی شهرستان ایلام با منطقه واسط به دست آمد. این بررسی نشان‌دهنده ارتباط مستقیم با منطقه واسط است به نحوی که هرگاه در منطقه واسط گردوغبار رخ دهد، در شهرستان ایلام نیز مشاهده خواهد شد.



شکل ۹- مدل‌های رگرسیونی شاخص AOD شهرستان ایلام با مناطق منشأ گردوغبار، (A): شهرستان ایلام با منطقه بلد، (B): شهرستان ایلام با منطقه بین‌النهرین، (C): شهرستان ایلام با منطقه میسان و (D): شهرستان ایلام با منطقه واسط

Fig. 9. Regression models of AOD index of Ilam county with dust source areas, A): Ilam county with Balad region, B): Ilam county with Mesopotamia region, C): Ilam county with Maysan region and D): Ilam county with Wasit region

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به شناسایی منشأ گردوغبار با استفاده از تنسور مکانی - زمانی گردوغبار در شهرستان ایلام از مارس تا ژوئن پرداخته است. در این تحقیق از داده‌های روزانه MCD19A2 سنجنده مادیس استفاده شد که توزیع گردوغبار را به درستی نشان می‌دهد، داده‌های مورد مطالعه (روزهای دارای گردوغبار) بر اساس آمار سازمان هواشناسی شناسایی شد و در نهایت با استفاده از تنسور مکان - زمان، مورد تحلیل قرار گرفت. تنسور، این قابلیت را دارد که تغییرات مکانی و زمانی پدیده‌ها را به درستی نمایش دهد. به کمک بررسی‌های آماری گذشته و تصاویر ماهواره‌ای، تغییرات مورد نظر را می‌توان به صورت دویبعی در یک بازه زمانی (روزانه، فصلی، سالانه) نشان داد که به صورت یک نقشه نمایش داده می‌شود، به همین دلیل نمی‌توان بررسی نمود که تغییرات در چه زمانی اتفاق افتاده است. اما در این پژوهش، با استفاده از تنسور تغییرات داده‌ها به صورت روزانه در یک فضای سه‌بعدی که بعد سوم آن زمان است به نمایش درآمده است. بدین وسیله می‌توان منشأ گردوغبار و تغییرات آن را در هر روز بررسی کرد که این یک برتری نسبت به سایر روش‌های قبلی است. نتایج حاصله از تنسور مورد بررسی، وضعیت گردوغبار منطقه مورد مطالعه را بحرانی نشان داد. با تجزیه و تحلیل داده‌ها، چهار منبع گردوغبار (بلد، بین‌النهرین، میسان و واسط) در منطقه مطالعاتی شناسایی شد. با تحلیل الگوی زمانی، ماه می، با بیشترین فراوانی گردوغبار و مقدار AOD 85/3 نمایانگر مقدار زیاد گردوغبار است که منشأ اصلی آن را می‌توان بین‌النهرین (رودخانه دجله و فرات) نامید. همچنین ماتریس همبستگی نشان داد که: ارتباط مستقیم معناداری بین شهرستان ایلام

و منطقه واسط وجود دارد. در واقع تنسور توانست منشأ گردوغبار در شهرستان ایلام را به درستی به صورت روزانه نشان دهد. از این رو توجه سیاست‌گزاران محیط‌زیست و منابع طبیعی برای استفاده از قابلیت‌های تنسور، امری ضروری و مفید به نظر می‌رسد. همچنین پیشنهاد می‌شود سایر پارامترهای تأثیرگذار آب‌وهوایی نظیر دما، پوشش گیاهی، تغییرات اقلیم، باد و سایر عوامل برای روند بهبود نتایج همراه با شاخص AOD مورد بررسی قرار گیرد.

References

- Abedzadeh, H. (2005). *Synoptic Analysis of Dust Systems in the West*. (Master's thesis). Faculty of Literature and Humanities, Razi University of Kermanshah. [In Persian]
- Alam, K., Qureshi, S., & Blaschke, T. (2011). Monitoring spatio-temporal aerosol patterns over Pakistan based on MODIS, TOMS and MISR satellite data and a HYSPLIT model. *Atmospheric Environment*, 45(27), 4641-4651. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.05.055>
- Al-Hemoud, A., Al-Dousari, A., Misak, R., Al-Sudairawi, M., Naseeb, A., Al-Dashti H., & Al-Dousari, N. (2019). Economic impact and risk assessment of sand and dust storms (SDS) on the oil and gas industry in Kuwait. *Sustainability*, 11(1), 200. <https://doi.org/10.3390/su11010200>
- Ali Bakhshi, T., Azizi, Z., Vafaeinejad, A., & Aghamohammadi Zanjabadi, H. (2020). Survey of area changes in water basins of Shahid Abbaspour dam caused by 2019 floods using Google Earth Engine. *Journal of Ecohydrology*, 7(2), 345-357. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/ije.2020.295785.1272>
- Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., ... & Brisco, B. (2020). Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: A comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5326-5350. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3021052>
- Ashrafi, K., Shafiepour-Motlagh, M., Aslemand, A., & Ghader, S. (2014). Dust storm simulation over Iran using HYSPLIT. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12, 1-9. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-9>
- Azimzadeh, H., Montazerghaem, M., Torabi Mirzaei, F., & Tajamlian, M. (2010). Measuring the falling dust of Yazd city using MDCO sediment trap during the three-month period of summer 2010. Paper presented at the Proceedings of the 2nd National Conference on Wind Erosion and Dust Storms, February 2010, Iranian Desert Control Management Association, Yazd University. [In Persian]
- Chamanpira, R., Karimi Sangchini, E., & Norouzi, A. A. (2021). Temporal and spatial analysis of dust occurrence in Lorestan province. *Journal of Environmental Science and Technology*, 23(6), 57-70. [In Persian] <https://doi.org/10.30495/JEST.2021.53171.5086>
- Chung, Y. S., Kim, H. S., Jugder, D., Natsagdorj, L., & Chen, S. J. (2003). On sand and duststorms and associated significant dustfall observed in Chongju-Chongwon, Korea during 1997–2000. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, 3, 5-19. <https://doi.org/10.1023/A:1023242000367>
- Draxler, R. R., Gillette, D. A., Kirkpatrick, J. S., & Heller, J. (2001). Estimating PM₁₀ air concentrations from dust storms in Iraq, Kuwait and Saudi Arabia. *Atmospheric Environment*, 35(25), 4315-4330. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00159-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00159-5)
- Formenti, P., Schütz, L., Balkanski, Y., Desboeufs, K., Ebert, M., Kandler, K., ... & Zhang, D. (2011). Recent progress in understanding physical and chemical properties of African and Asian mineral dust. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(16), 8231-8256. <https://doi.org/10.5194/acp-11-8231-2011>

- Golmohammadi, M., Etemadfrad, H., & Kharaghani, H. (2023). Spatio-temporal analysis of the covid-19 impacts on the using Chicago urban shared bicycles by tensor-based approach. *Journal of Geospatial Information Technology*, 10(3), 95-119. [In Persian] <https://dx.doi.org/10.52547/jgit.10.3.95>
- Goodarzi, M., Hoseini, A., & Ahmadi, H. (2018). Assessing temporal and spatial distribution of dust storm in the south and South West of Iran. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 11(39), 1-10. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089554.1396.11.39.9.7>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine, planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Goudarzi, G. R., Shirmardi, M., Naimabadi, A., Ghadiri, A., & Sajedifar, J. (2019). Chemical and organic characteristics of PM_{2.5} particles and their in-vitro cytotoxic effects on lung cells, The Middle East dust storms in Ahvaz, Iran. *Science of The Total Environment*, 655, 434-445. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.153>
- Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2001) Saharan Dust Storms, Nature and Consequences. *Earth Sciences Review*, 56, 179-204. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00067-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00067-8)
- Hamidi, M., Kavianpour, M. R., & Shao, Y. (2013). Synoptic analysis of dust storms in the Middle East. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49, 279-286. <https://doi.org/10.1007/s13143-013-0027-9>
- Karami, S., Hossein Hamzeh, N., Alam, K., Noori, F., & Ranjbar Saadat Abadi, A. (2021). Spatio-temporal and synoptic changes in dust at the three islands in the Persian Gulf region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 214, 105539. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105539>
- Khalid, M. (2020). Geopolitics of water conflict in West Asia, The Tigris-Euphrates Basin. *FINS Journal of Diplomacy and Strategy*, 4(1), 1-7.
- Kim, J. (2008). Transport routes and source regions of Asian dust observed in Korea during the past 40 years (1965-2004). *Atmospheric Environmental*, 42(19), 4778-4789. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.01.040>
- Lee, H., Kim, H., Honda, Y., Lim, Y. H., & Yi, S. (2013). Effect of Asian dust storms on daily mortality in seven metropolitan cities of Korea. *Atmospheric Environment*, 79, 510-517. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.046>
- Li, D., Yu, Z., Wu, F., Luo, W., Hu, Y., & Yuan, L. (2020). The tensor-based feature analysis of spatiotemporal field data with heterogeneity. *Earth and Space Science*, 7(2), e2019EA001037. <https://doi.org/10.1029/2019EA001037>
- Lyapustin, A., Wang, Y., Korkin, S., & Huang, D. (2018). MODIS collection 6 MAIAC algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(10), 5741-5765. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5741-2018>
- Mianabadi, H., & Amini, A. (2019). Complexity of water, politics, and environment in the Euphrates and Tigris river basins. *Geopolitics Quarterly*, 15(2), 54-86. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17354331.1398.15.54.3.6>
- Middleton, N. (2017). Desert dust hazards, A global review. *Aeolian Research*, 24, 53-63. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.12.001>
- Mohammadi, F., & Zargari, M. (2014). Investigation and analysis of the temporal-spatial distribution of dust in Tehran province. Paper presented at the Proceedings of the International Conference on Geography, Urban Planning and Sustainable Development, Tehran, Koomesh Environmental Society, University of Technology. [In Persian]
- Namdari, S., Karimi, N., Sorooshian, A., Mohammadi, G., & Sehatkashani, S. (2018). Impacts of climate and synoptic fluctuations on dust storm activity over the Middle East. *Atmospheric Environment*, 173, 265-276. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.016>
- Namdari, S., Valizade, K. K., Rasuly, A. A., & Sari Sarraf, B. (2016). Spatio-temporal analysis of MODIS AOD over western part of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(3), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2029-7>

- Qin, W., Liu, Y., Wang, L., Lin, A., Xia, X., Che, H., ... & Zhang, M. (2018). Characteristic and driving factors of aerosol optical depth over mainland China during 1980–2017. *Remote Sensing*, 10(7), 1064. <https://doi.org/10.3390/rs10071064>
- Remer, L. A., Tanré, D., Kaufman, Y. J., Levy, R., & Mattoo, S. (2006). Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS: Collection 005. *National Aeronautics and Space Administration*, 1490. <https://modis.gsfc.nasa.gov>
- Rezaei Moghaddam, M. H., Sedighi, A., Fasihi, S., & Karimi Firozjaei, M. (2018). Effect of environmental policies in combating aeolian desertification over Sejzy Plain of Iran. *Aeolian Research*, 35, 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2018.09.001>
- Schepanski, K., Tegen, I., & Macke, A. (2012). Comparison of satellite based observations of Saharan dust source areas. *Remote Sensing of Environment*, 123, 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.019>
- Shahsavani, A., Naddafi, K., Haghighifard, N. J., Mesdaghinia, A., Yunesian, M., Nabizadeh, R., ... & Goudarzi, G. (2012). The evaluation of PM10, PM2. 5, and PM1 concentrations during the Middle Eastern Dust (MED) events in Ahvaz, Iran, from April through September 2010. *Journal of Arid Environments*, 77, 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.09.007>
- Shi, L., Zhang, J., Yao, F., Zhang, D., & Guo, H. (2021). Drivers to dust emissions over dust belt from 1980 to 2018 and their variation in two global warming phases. *Science Total Environment*, 767, 144860. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144860>
- Soleimany, A., Grubliauskas, R., & Šreivičienė, V. (2021). Application of satellite data and GIS services for studying air pollutants in Lithuania (Case study, Kaunas city). *Air Quality Atmosphere and Health*, 14, 411-429. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00946-z>
- Soleimany, A., Solgi, E., Ashrafi, K., Jafari, R., & Grubliauskas, R. (2022). Temporal and spatial distribution mapping of particulate matter in southwest of Iran using remote sensing, GIS, and statistical techniques. *Air Qual Atmos Health*, 15, 1057-1078. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01179-y>
- Stafoggia, M., Bellander, T., Bucci, S., Davoli, M., De Hoogh, K., De'Donato, F., ... & Schwartz, J. (2019). Estimation of daily PM10 and PM2. 5 concentrations in Italy, 2013–2015, using a spatiotemporal land-use random-forest model. *Environment International*, 124, 170-179. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.016>
- Taghavi, F., Oulad, E., & Ackerman, S. A. (2017). Enhancement and identification of dust events in the south-west region of Iran using satellite observations. *Journal of Earth System Science*, 126, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12040-017-0808-0>
- Wang, X., Zhou, Z., & Dong, Z. (2006). Control of dust emissions by geomorphic conditions, wind environments and land use in northern China, an examination based on dust storm frequency from 1960 to 2003. *Geomorphology*, 81(3-4), 292-308. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.015>
- Yu, Y., Kalashnikova, O. V., Garay, M. J., Lee, H., & Notaro, M. (2018). Identification and characterization of dust source regions across North Africa and the Middle East using MISR satellite observations. *Geophysical Research Letters*, 45(13), 6690-6701. <https://doi.org/10.1029/2018GL078324>



Analysis of the Role of Morphotectonic Processes on the Potential Risk of Slope instability in the Shaharchay River Basin of Urmia

Fariba Hemmati ^{1*}, Saber Seyed Ahmadi ², Akram Alizadeh ³

¹Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran

²M.Sc., Technical and Soil Mechanics Laboratory, Maku, Iran

³Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 04 June 2025

Revised: 30 July 2025

Accepted: 05 August 2025

Available Online: 06 August 2025

Keywords:

Landslide Susceptibility

Slope Instability

Geomorphological Factors

Logistic Regression Modeling

Active Fault

Landslide Hazard Zonation

ABSTRACT

This study was conducted to analyze the effects of active tectonic processes on geomorphological features and assess the potential for slope instability occurrences within the Shaharchay River Basin of Urmia. To achieve this objective, an integrated approach was employed, utilizing morphotectonic indices (such as hierarchical stream anomaly, anomaly density, and bifurcation ratio), logistic regression statistical modeling, and analysis of remote sensing data and field data. The results from the logistic regression model (with an ROC accuracy of 0.922) indicate that approximately 43.13% of recorded instabilities in areas characterized by semi-resistant to resistant lithologies are located within less than 1 km from active faults. Furthermore, 87.25% of these instabilities occurred within 3 km of rivers, and occurred within 2 km of roads 90%, typically in areas with sparse or inadequate vegetation cover. The analysis of landslide hazard zonation reveals that the highest hazard is concentrated in elevations ranging 1268 and 2000 m and on south-facing slopes. The findings highlight the significant role of active tectonics, slope gradient, and human infrastructure (such as roads) in intensifying slope instability processes. Consequently, adopting an integrated approach to risk management, restoring natural vegetation cover, and implementing land-use restrictions in high-risk areas are deemed essential.

* Corresponding author: Dr. Fariba Hemmati

E-mail address: F.Hemmati@cfu.ac.ir

How to cite this article: Hemmati, F., Seyed Ahmadi, S., & Alizadeh, A. (2025). Analysis of the Role of Morphotectonic Processes on the Potential Risk of Slope instability in the Shaharchay River Basin of Urmia. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 18-37. <https://doi.org/10.22067/geoh.2025.93808.1578>



©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

Landslide hazards and slope instabilities rank among the most devastating geomorphological natural hazards, inflicting significant human, economic, and environmental losses on a global scale each year. Iran, situated within the tectonically active Alpine-Himalayan belt, is especially prone to these hazards due to its rugged mountainous terrain, seasonal heavy rainfall, and complex geological framework. This study focuses on the Shahrchay River Basin in Urmia, northwestern Iran, a region characterized by intense tectonic activity and diverse geomorphological features that amplify the risk of slope failures. The historical backdrop reveals that landslides in Iran, particularly in mountainous zones such as the Zagros, Alborz, and Binalud ranges, are driven by a complex interplay of natural factors—including geological composition, topographic steepness, climatic variability, and hydrological dynamics—and human-induced activities such as land-use alterations, road construction, and vegetation clearance. Previous research, including works by Hemmati and Mokhtari (2017) and Baharvand and Sori (2015), has underscored the pivotal role of tectonic processes, notably faulting and the resultant increase in shear stress, in initiating landslides. The Shahrchay Basin, located near active fault systems like the Urmia Lake Fault, North and South Salmas Faults, Ashnoye Fault, and Kuh-e-Shahidan Fault, exemplifies this vulnerability, with notable seismic events such as the 5.7 magnitude Silvaneh earthquake in April 2015, the 7.9 magnitude earthquake in October 1965, and the aftershocks following the 1982 Ahar-Varzeqan earthquake highlighting the region's seismic susceptibility. The primary objective of this research is to explore the detailed relationship between morphotectonic indices, drainage network patterns, and slope instability risks, tackling the core question of how active tectonic processes reshape drainage structures and predispose the area to landslides. This study addresses a significant knowledge gap, as integrated analyses combining tectonic, geomorphological, and anthropogenic factors in the Shahrchay Basin remain scarce, despite the urgent need for enhanced risk management, hazard zoning, and sustainable development strategies. The research is directed toward environmental scientists, geologists, urban planners, policymakers, and disaster management professionals, employing a multidisciplinary approach that integrates geomorphological assessments with advanced statistical modeling to deliver practical insights for land-use planning and disaster mitigation. The methodological design is grounded in its ability to construct a theoretical framework for understanding tectonic influences on slope stability while providing actionable applications for hazard reduction in comparable mountainous regions. The literature review, drawing on studies by Khazri et al. (2006), Nikjoo et al. (2016), and Rofii et al. (2014), highlights ongoing debates regarding the relative impacts of tectonic versus human factors, leading to the hypothesis that tectonic activity, when compounded by human disturbances, is a primary driver of landslide occurrences in the basin. This framing sets expectations for a comprehensive analysis that bridges theoretical geomorphology with practical policy implications, addressing both the scientific community's need for deeper understanding and the public's demand for safety measures.

Material and Methods

This investigation adopts a multi-stage, integrated methodology to evaluate the contributions of geomorphological and tectonic factors to slope instabilities in the Shahrchay River Basin. The approach encompasses data collection, spatial processing using Geographic Information Systems (GIS), extraction of geomorphic indices, statistical modeling, and thorough validation of findings. Data were compiled from diverse sources: satellite imagery from Landsat-9 (2023, 30-meter resolution) and Sentinel-2 (10-meter resolution) supplied land cover and Digital Elevation Model (DEM) data, obtained from the USGS, while geological maps (1:100,000 scale) and topographic maps (1:50,000 scale) were sourced from the Geological Survey of Iran and the National Cartographic Center, respectively. Field surveys augmented these datasets with detailed records of landslide locations, types, and characteristics, ensuring a robust empirical base. In the GIS environment, topographic layers—such as slope, aspect, and elevation classes—were generated from the DEM, and landslide distribution was mapped using Band 6 of Landsat-9 imagery, correlated with nine

critical variables: elevation, slope, aspect, distance from faults, rivers, roads, lithology, vegetation cover, and land use. Each variable was assigned a sensitivity score ranging from 1 to 5, with 5 indicating the highest risk, following established geohazard assessment protocols. Key geomorphic indices, including hierarchical anomaly (Δa), anomaly density (g_a), bifurcation ratio (R_b), asymmetry factor (AF), and basin shape ratio, were calculated using standardized formulas within GIS, building on methodologies outlined by Nikjoo et al. (2016) and Burbank and Anderson (2011). The logistic regression model was applied to predict landslide probability, utilizing a nonlinear S-shaped curve to link independent variables (e.g., distance from faults) with a binary dependent variable (landslide occurrence or non-occurrence). Calibration involved assigning 1 to unstable areas and 0 to stable ones, with data processed in IDRISI software. Validation was performed by comparing zoning maps with field observations, employing Chi-Square tests (95% confidence level), Receiver Operating Characteristic (ROC) curves (target value >0.7), and Pseudo R^2 (>0.2) to assess model accuracy, fit, and predictive power. This methodology ensures replicability and complies with ethical standards by relying on secondary data and non-invasive field techniques, with no direct involvement of human or animal subjects, thus negating the need for specific consent procedures. The approach's descriptive and interpretive nature aligns with the study's objectives of elucidating tectonic impacts and informing practical interventions.

Results and Discussion

Analysis reveals a multifaceted interaction between tectonic processes and geomorphological dynamics in driving slope instabilities throughout the Shahrchay Basin. The hierarchical anomaly index (Δa) of 1.34 indicates a lower-than-expected ratio of higher-order to first-order streams, suggesting potential tectonic disruption or geomorphic adjustments, a pattern supported by regional studies from Khazri et al. (2006). The anomaly density (g_a) of 1.33 anomalies per square kilometer reflects significant tectonic activity, while the bifurcation ratio (R_b) of 1.75, below the global average of 3-5, may suggest lithological or climatic modulation rather than dominant tectonic control, consistent with insights from Burbank and Anderson (2011). The asymmetry factor (AF) of 54.39 indicates a leftward stream shift, likely attributable to lateral fault movements, and a basin shape ratio of 5.62 suggests tectonic elongation aligned with fault orientations. Spatial analysis of landslide distribution, derived from 2023 Landsat imagery, identified 42.4 square kilometers (0.61% of the basin) as unstable, with a pronounced concentration in lower elevations (1268-2000 meters) where human activities such as agriculture, road construction, and urbanization are prevalent, resulting in reduced vegetation cover and diminished soil cohesion. Slope analysis indicated peak instability at 5-20% gradients, linked to human disturbances and unstable lithologies like marls, shales, and loose alluvial deposits, while southern and southeastern aspects exhibited higher risks due to increased solar exposure and soil desiccation.

This study employed a logistic regression model ($ROC = 0.922$) to analyze the key factors influencing slope instability. The results indicated that elevation, slope, distance to faults and rivers, and vegetation cover type exerted the most significant influence, respectively. The findings revealed that 87.25% of instability events occurred within 3 km of rivers, 90% occurred within 2 km of roads in areas of sparse vegetation, and 43.13% occurred in moderate to resistant lithological units within 1 km of active faults. Spatial analyses further showed that hazard hotspots were primarily located at elevations of 1268–2000 m, on gentle to moderate slopes (5–20%), and on southern and southeastern aspects. Moreover, over 87% of instability events occurred within 3000 meters of watercourses. The results underscore the determining tripartite influence of active tectonics (faults), topography (elevation/slope), and anthropogenic activities (road construction/vegetation reduction) in exacerbating geohazards.

Conclusion

This research illuminates the dominant role of tectonic activities, particularly active faulting, in shaping slope instability hazards within the Shahrchay Basin, with morphotectonic indices providing crucial insights into drainage network disruptions and landslide triggers. The findings reaffirm the importance of the research problem, as landslides in tectonically active regions like Iran continue to endanger human lives, infrastructure, and ecosystems, a concern echoed by Hemmati and Mokhtari (2017), Ngarash et al. (2013), and Baharvand and Sori (2015). Theoretically, the study enriches geomorphological models by integrating tectonic and anthropogenic influences, offering a foundation for future research into hazard dynamics and landscape evolution. Practically, the results provide critical guidance for land-use policies, advocating for restricted development in high-risk zones, prioritized reforestation to enhance slope stability, and improved water management to mitigate erosion. The high ROC value (0.9223) and field validation indicate that the logistic regression model accurately predicts landslide susceptibility, potentially explaining real-world phenomena such as seasonal landslide reactivation during heavy rains, as observed by Baharvand and Sori (2015), and offering a basis for modeling similar geohazards elsewhere. Applications are justified, particularly in zoning for controlled construction, implementing watershed management projects, and developing early warning systems, yet unresolved challenges persist, including accounting for long-term climatic variability, adapting to urban expansion pressures, and refining models with advanced technologies like LiDAR and real-time monitoring. The study's contribution justifies attention from both specialists and policymakers, offering a replicable framework for hazard management, which can be extended to other tectonically active basins in Iran, addressing broader environmental resilience, disaster preparedness, and sustainable development issues. Future research could focus on longitudinal studies to track tectonic and climatic interactions, enhancing predictive models and supporting adaptive management strategies in the face of evolving environmental conditions.



تحلیل نقش فرآیندهای مورفوتکتونیک بر پتانسیل خطر ناپایداری دامنه‌ای در حوضه آبریز شهرچای ارومیه

فریبا همتی^{۱*}، صابر سید احمدی^۲، اکرم علیزاده^۳

^۱ گروه آموزشی جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران

^۲ کارشناسی ارشد آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، ماکو، ایران

^۳ دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

این پژوهش با هدف تحلیل اثرات فرآیندهای تکتونیک فعال بر ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و ارزیابی پتانسیل وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای در حوضه آبریز شهرچای ارومیه انجام شده است. برای دستیابی به این هدف، از تلفیقی از شاخص‌های مورفوتکتونیک (مانند ناهنجاری سلسله مراتبی آبراه‌ها، تراکم ناهنجاری‌ها و نسبت انشعابات)، مدل‌سازی آماری رگرسیون لجستیک و تحلیل داده‌های سنجش از دور و داده‌های میدانی بهره گرفته شد. نتایج حاصل از مدل رگرسیون لجستیک (با دقت ROC=0.922) نشان می‌دهد که حدود ۴۳/۱۳ درصد از ناپایداری‌های ثبت‌شده در نواحی با لیتولوژی متوسط تا مقاوم، در فاصله کمتر از ۱ کیلومتر از گسل‌های فعال واقع شده‌اند. همچنین ۸۷/۲۵ درصد از این ناپایداری‌ها در فاصله‌ای کمتر از ۳ کیلومتر از رودخانه‌ها و ۹۰ درصد از آن‌ها در فاصله‌ای کمتر از ۲ کیلومتر از جاده‌ها با پوشش گیاهی کم‌تراکم یا فاقد پوشش مناسب رخ داده‌اند. تحلیل پهنه‌بندی خطر ناپایداری نیز نشان می‌دهد که بیشترین خطر در ارتفاعات بین ۱۲۶۸ تا ۲۰۰۰ متر و در دامنه‌ها، با جهت جنوبی متمرکز است. یافته‌ها بیانگر نقش مؤثر تکتونیک فعال، شیب زمین و زیرساخت‌های انسانی (مانند جاده‌ها) در تشدید فرآیندهای ناپایداری دامنه‌ای است. براین اساس، اتخاذ رویکردی یکپارچه در مدیریت خطر، احیای پوشش گیاهی طبیعی و اعمال محدودیت‌های کاربری اراضی در مناطق پرخطر ضروری به نظر می‌رسد.

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴

کلمات کلیدی:

حساسیت زمین لغزش

ناپایداری دامنه‌ای

عوامل ژئومورفولوژیکی

مدل‌سازی رگرسیون لجستیک

گسل فعال

پهنه‌بندی خطر زمین لغزش

مقدمه

ناپایداری‌های دامنه‌ای، به‌ویژه زمین‌لغزش‌ها، از مهم‌ترین بلایای طبیعی ژئومورفولوژیکی به شمار می‌آیند که سالانه خسارات قابل توجهی را در ابعاد انسانی، اقتصادی و زیست‌محیطی به جوامع وارد می‌سازند (Hemmati & Mokhtari, 2018). این پدیده‌ها معمولاً در اثر تعامل پیچیده میان عوامل طبیعی نظیر ویژگی‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، اقلیم و هیدرولوژی با مداخلات انسانی همچون تغییر کاربری اراضی، احداث جاده و تخریب پوشش گیاهی شکل می‌گیرند (Esfandiari Darabad, 2008; Hemmati & Roostaei, Mokhtari & khodaiae, 2015; Mokhtari, 2018). از سوی دیگر، مداخلات انسانی مانند تغییر کاربری اراضی، تخریب پوشش گیاهی، احداث جاده‌ها و سازه‌ها در شیب‌های ناپایدار، و استخراج بی‌رویه منابع طبیعی، با تضعیف مقاومت مکانیکی مواد دامنه‌ای، احتمال وقوع این مخاطرات را افزایش می‌دهند (Baharvand & Soori, 2016; Negaresh, Faizi, Hodaei, Mollashahi & Baharvand & Soori, 2016; Roostaei & Khodaei, 2016; Shahhiseini, 2013). در میان عوامل مؤثر، فعالیت‌های زمین‌ساختی نقش بسزایی در تحریک ناپایداری‌های دامنه‌ای دارند. این فعالیت‌ها با ایجاد گسل، شکستگی، شیب‌های تند و افزایش تنش‌های برشی در دامنه‌ها، شرایط را برای گسیختگی توده‌های زمین فراهم می‌سازند (Valizadeh Kamran & Hashemzadeh, 2022). پژوهش‌های متعددی در حوضه‌های آبریز چناران (خراسان شمالی)، تسوج (آذربایجان شرقی) و زاب (آذربایجان شرقی) همپوشانی میان الگوهای زمین‌لغزش و ساختارهای تکتونیکی فعال را تأیید کرده‌اند (Khezri, Roostaei & Radjaei Asl, 2006; Moghimi, Alavi Panah & Jafari, 2008). در سطح ملی، ایران به واسطه قرارگیری در کمربند فعال آلپ - هیمالیا، توپوگرافی کوهستانی و بارندگی فصلی شدید، از مناطق پرریسک ناپایداری‌های دامنه‌ای محسوب می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده در مناطق زاگرس، البرز و بینالود، نقش هم‌افزایی فعالیت‌های تکتونیکی و الگوهای هیدروژئومورفولوژیک در تحریک ناپایداری‌ها را نشان داده‌اند (Asghari Saeskanrood, 2018; Mohammadzadeh Shishegaram & Asghari Saeskanrood, 2022; Nikjoo, Boromand, Roostaei & Amirahmadi, 2018).

بر اساس مطالعات پیشین، زمین‌لغزش‌ها یکی از پرخسارت‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی در ایران به‌شمار می‌آیند که سالانه زیان‌های مالی و انسانی قابل توجهی به بار می‌آورند (Negaresh et al., 2013). این وضعیت، ضرورت ارتقاء مدیریت ریسک و بهره‌گیری از روش‌های علمی برای شناسایی و پهنه‌بندی مناطق پرخطر را برجسته می‌سازد.

یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در بروز ناپایداری‌های دامنه‌ای، فعالیت‌های زمین‌ساختی است. شواهد متعددی حاکی از ارتباط مستقیم بین گسل‌های فعال و پراکندگی زمین‌لغزش‌ها در مناطق مختلف کشور است. برای نمونه، در حوضه تسوج، همپوشانی مکانی بین زمین‌لغزش‌ها و گسل‌های فعال نشان‌دهنده نقش تکتونیک در تشدید ناپایداری‌های دامنه‌ای است (Rafiei, Asadian & Ahmadi, 2015). همچنین، در مطالعات حوضه‌های زاب و بینالود، شاخص‌های مورفوتکتونیکی مانند نسبت مساحت به محیط حوضه و تراکم آبراهه‌ها، به‌عنوان شاخص‌هایی برای ارزیابی فعالیت زمین‌ساختی، همبستگی بالایی با رخداد ناپایداری‌ها داشته‌اند (Nikjoo et al., 2018; Khezri et al., 2006).

از منظر هیدرولوژیکی، بارش‌های شدید به‌عنوان یکی از عوامل تحریک‌کننده زمین‌لغزش شناخته می‌شوند. در برخی مطالعات خارجی، مانند پژوهش انجام‌شده در منطقه زاوچو چین، رابطه مستقیمی بین بارش‌های فصلی و نرخ جابجایی دامنه‌ها (تا ۴۶۱ میلی‌متر در سال) با استفاده از تداخل‌سنجی (InSAR)، گزارش شده است که حاکی از تأثیر رطوبت بر کاهش مقاومت برشی مصالح دامنه‌ای است (Shi & Hu, 2023). در ایران نیز، بارش‌های سنگین در ارتفاعات زاگرس و البرز، به‌ویژه در فصل‌های مرطوب، موجب فعال شدن مجدد لغزش‌های قدیمی و وقوع لغزش‌های جدید می‌شوند (Baharvand & Soori, 2016).

فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه در مناطق کوهستانی، نقش قابل توجهی در افزایش خطر ناپایداری دارند. توسعه سکونتگاه‌ها در مناطق شیب‌دار، احداث راه‌های ارتباطی با خاک‌برداری‌های نامتناسب و تخریب پوشش گیاهی، منجر به اختلال در تعادل طبیعی دامنه‌ها می‌شود. به‌عنوان نمونه، در محور اردبیل - آستارا، احداث جاده در اراضی با لیتولوژی رسی و نزدیکی به گسل‌های فرعی باعث افزایش

وقوع زمین‌لغزش شده است (Esfandiari Darabad, 2008). همچنین، مطالعات انجام‌شده در منطقه شمالی پلوپونز یونان نشان داد که بین الگوی توسعه راه‌ها و تغییر کاربری‌اراضی با پراکندگی مکانی ریزش‌ها رابطه‌ای معنادار وجود دارد (Skilodimou, Bathrellos, 2022). در پاسخ به این مخاطرات، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در مدیریت محیطی مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، به‌کارگیری مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نظیر فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP، شبکه عصبی مصنوعی (MLP) و روش‌های نوین سنجش از دور مانند (InSAR) در مطالعات مختلف پیشنهاد شده است. برای نمونه، در مطالعات صورت‌گرفته در حوضه‌های زاب (Khezri et al., 2006) و بینالود (Nikjoo et al., 2018)، این روش‌ها جهت مدل‌سازی خطر ناپایداری دامنه‌ای با موفقیت به‌کار گرفته شده‌اند.

در ایران، مطالعات متعددی رابطه میان تکتونیک فعال و زمین‌لغزش‌ها را بررسی کرده‌اند. شریفی و همکاران (Sharifi, Solgi & Pourkermani, 2013)، بابلی مؤخر (Babolimoakher, 2022) و شیرانی (Shirani, 2018) با تأکید بر اهمیت شاخص‌های مورفومتریک و مورفوتکتونیک نشان داده‌اند که این شاخص‌ها در تحلیل و پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش نقش کلیدی دارند. یافته‌های این مطالعات بر نقش تلفیقی عوامل زمین‌ساختی (مانند فاصله از گسل و شاخص‌های مورفوتکتونیک) و زمین‌شناختی (نظیر شیب، لیتولوژی و کاربری‌اراضی) در تعیین پهنه‌های پرخطر تأکید دارند. با این حال، کمبود مطالعات جامع که به بررسی هم‌زمان ساختار شبکه زهکشی، ویژگی‌های مورفوتکتونیک و تأثیر آن‌ها بر پایداری دامنه‌ها در مناطق کوهستانی ایران، به‌ویژه در حوضه‌هایی نظیر شهرچای ارومیه، پردازند، همچنان احساس می‌شود.

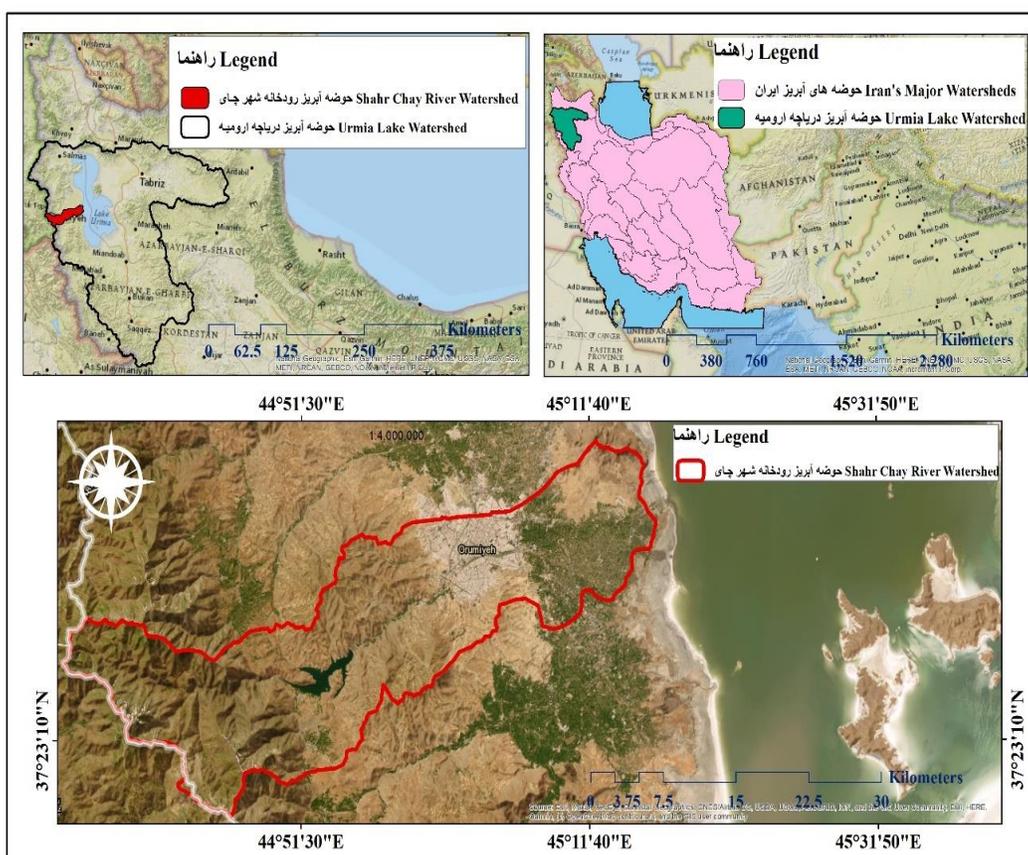
بر این اساس، هدف این پژوهش، تحلیل رابطه میان شاخص‌های مورفوتکتونیک، الگوهای شبکه‌زهکشی و خطر ناپایداری دامنه‌ای در حوضه شهرچای ارومیه است. سؤال اصلی این است که: تا چه میزان فرآیندهای زمین‌ساختی فعال، ساختار شبکه زهکشی را تغییر داده و زمینه‌ساز بروز ناپایداری‌های دامنه‌ای در این منطقه شده‌اند؟ نتایج این مطالعه می‌تواند به بهبود پهنه‌بندی خطر و سیاست‌گذاری در مدیریت ریسک ناپایداری‌ها در نواحی کوهستانی ایران کمک کند.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز شهرچای ارومیه در شمال غرب ایران و در محدوده استان آذربایجان غربی قرار دارد. این حوضه در فاصله ۱۲ کیلومتری جنوب غربی شهر ارومیه واقع شده و بین مختصات جغرافیایی $35^{\circ} 35'$ تا $45^{\circ} 17'$ طول شرقی و عرض‌های جغرافیایی $37^{\circ} 19'$ تا $37^{\circ} 35'$ شمالی گسترده شده است (شکل ۱). حوضه شهرچای بخشی از سامانه حوضه‌های آبریز تغذیه‌کننده دریاچه ارومیه محسوب می‌شود و تأمین‌کننده بخش قابل‌توجهی از منابع آب سطحی و زیرزمینی مورد نیاز شرب، کشاورزی و صنایع در منطقه ارومیه است. رودخانه شهرچای، که منبع اصلی تغذیه این حوضه است، از ارتفاعات مرزی ایران و ترکیه سرچشمه می‌گیرد و پس از عبور از اراضی کوهستانی و دره‌های عمیق، به سمت جنوب جریان می‌یابد. مورفولوژی حوضه، شامل: مناطق مرتفع، دامنه‌های شیب‌دار و پوشش گیاهی است که نقش مهمی در حفظ رواناب‌ها و کنترل فرسایش ایفا می‌کند.

از منظر زمین‌ساختی، این حوضه در مرز بین زون‌های تکتونیک زاکرس و ایران مرکزی قرار گرفته و تحت تأثیر مجموعه‌ای از گسل‌های فعال شامل گسل دریاچه ارومیه، گسل‌های شمال و جنوب سلماس، گسل اشنویه، گسل کوه شهیدان و خطواره ارومیه می‌باشد. فعالیت این ساختارها، که در سوابق لرزه‌ای تاریخی و معاصر منعکس شده است، بیانگر وضعیت فعال تکتونیک در منطقه است (Malekzadeh, Sharifi & Elyasi, 2005). به‌عنوان نمونه، زمین‌لرزه‌هایی مانند زلزله سیلوانه در فروردین ۱۳۹۴ با بزرگای حدود ۵/۷ ریشتر، زلزله مرداد ۱۳۶۲ (دنباله زلزله اهر و ورزقان) و زلزله ۷/۹ ریشتری مهرماه ۱۳۶۴ در سیلوانه نشان از لرزه‌خیزی بالای منطقه دارند.

تحلیل مقایسه‌ای بین داده‌های بارش سال‌های ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۸ و نوسانات سطح آب زیرزمینی حاکی از ارتباط احتمالی بین حرکات تکتونیکی و تغییرات هیدرولوژیکی در این حوضه است (Kiani & Yousefi, 2018). علاوه بر آن، شیب‌های تند، نرخ بالای فرسایش خاک، و فعالیت‌های دامنه‌ای از جمله چالش‌های ژئومورفیک این حوضه محسوب می‌شوند. همچنین شیب‌های تند، فرسایش خاک و فرآیندهای دامنه‌ای از چالش‌های عمده این حوضه به شمار می‌آیند. در سال‌های اخیر، کاهش قابل توجه بارندگی و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب، منجر به تنش آبی مضاعف در سیستم رودخانه‌ای و آبخوان‌های منطقه شده است. موقعیت ویژه حوضه شهرچای در محل تلاقی گسل‌های فعال و ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده، زمینه‌ای مناسب برای تحلیل ارتباط بین فعالیت‌های تکتونیکی، تحولات ژئومورفولوژیکی و ناهنجاری‌های شبکه زهکشی فراهم کرده است.



شکل ۱- نقشه حوضه آبریز شهرچای و موقعیت آن در حوضه‌های آبریز ایران
Fig.1. Shahrchay Watershed and Its Location in Iran's Watersheds

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف ارزیابی نقش عوامل ژئومورفولوژیکی و تکتونیکی در ناپایداری‌های دامنه‌ای، در قالب یک رویکرد تلفیقی و چندمرحله‌ای طراحی شده است. مراحل اصلی شامل: گردآوری و آماده‌سازی داده‌ها، تحلیل مکانی و تهیه لایه‌های اطلاعاتی، استخراج شاخص‌های ژئومورفیک، مدل‌سازی رگرسیون لجستیک و اعتبارسنجی نتایج می‌باشد.

(۱) گردآوری و آماده‌سازی داده‌ها: داده‌های مورد نیاز از منابع مختلف گردآوری شده‌اند:

داده‌های ماهواره‌ای: تصاویر سنجنده Landsat-9 مربوط به سال ۲۰۲۳ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و مدل رقومی ارتفاع (DEM) از پایگاه داده USGS اخذ گردید. برای شناسایی پوشش‌زمین، از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 با وضوح مکانی ۱۰ متر استفاده شد و داده‌های پردازش‌شده پوشش‌زمین پایگاه Esri Landcover به‌عنوان مرجع برای تلفیق و تحلیل داده‌ها به کار گرفته شدند.

داده‌های سازمانی: نقشه‌های زمین‌شناسی (مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) برای محدوده‌های ارومیه، اشنویه، سیلوانه و سرو از سازمان زمین‌شناسی و نقشه‌های توپوگرافی (مقیاس ۱:۵۰۰۰۰) از سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شدند.

داده‌های میدانی: اطلاعات مربوط به موقعیت و ویژگی‌های ناپایداری‌های دامنه‌ای با استفاده از بازدید میدانی و مطالعات پیشین جمع‌آوری گردید.

(۲) تحلیل مکانی و تهیه لایه‌های اطلاعاتی: در محیط نرم‌افزاری GIS، لایه‌های مختلف محیطی و ساختاری تولید و تحلیل شدند:

لایه‌های توپوگرافی: با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، نقشه‌های شیب، جهت‌شیب و طبقات ارتفاعی تولید شدند. توزیع مکانی ناپایداری‌ها: با تحلیل داده‌های میدانی و Band 6 تصاویر Landsat-9، نقاط ناپایداری شناسایی و با ۹ عامل کلیدی (ارتفاع، شیب، جهت‌شیب، فاصله از گسل، رودخانه، جاده، لیتولوژی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی) مورد تحلیل قرار گرفتند. کدگذاری عوامل: به هر طبقه از متغیرهای مؤثر، امتیازی بین ۱ تا ۵ بر اساس شدت حساسیت نسبت داده شد (امتیاز ۵ نشان‌دهنده بالاترین حساسیت).

(۳) شاخص‌های ژئومورفیک: با هدف ارزیابی تأثیر تکتونیک فعال، شاخص‌های ژئومورفیک کلیدی شامل ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa)، تراکم ناهنجاری (ga)، نسبت انشعاب (Rb) و درصد عدم تقارن حوضه (AF) با استفاده از فرمول‌های استاندارد و در محیط GIS استخراج شدند. خلاصه روابط و منابع به شرح جدول ۱ است (Keller & Pinter, 2002):

جدول ۱- شاخص‌های ژئومورفیک و روابط محاسباتی

Table 1- Geomorphologic Indices and Computational Relationships

شاخص Index	رابطه / رفرنس Relationship / Reference
شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی (Δa)	$\Delta a = \frac{Ha_t}{N1}$
Hierarchical anomaly index (Δa)	$\Delta a =$ شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی، $Ha_t =$ تعداد ناهنجاری‌های سلسله‌مراتبی، $N1 =$ تعداد واقعی آبراه‌های رتبه ۱ (Guarnieri & Pirrotta, 2008).
	$\Delta a =$ Hierarchical Anomaly Index, $Ha_t =$ Total count of hierarchical anomalies, $N1 =$ Actual number of 1st-order streams (Guarnieri & Pirrotta, 2008).

$ga = \frac{Ha_t}{A}$ <p>شاخص تراکم ناهنجاری سلسله‌مراتبی (ga) Density of Hierarchical Anomaly (ga)</p> <p>ga = شاخص تراکم ناهنجاری سلسله‌مراتبی، Ha_t = تعداد ناهنجاری سلسله‌مراتبی آبراهه برای کل حوضه، A = مساحت حوضه (Ciccacci et al, 1987).</p> <p>ga = Hierarchical Anomaly Density Index, Ha_t = Total count of hierarchical anomalies for the entire basin, A = Basin Area (Ciccacci et al, 1987).</p>	
$Rb(u - u + 1) = \frac{Nu}{Nu + 1}$ <p>نسبت انشعاب (Rb) Bifurcation Ratio (Rb)</p> <p>Rb = شاخص نسبت انشعاب، Nu = تعداد آبراهه‌های رتبه ویژه، Nu + 1 = تعداد آبراهه‌های رتبه بالاتر (Guarnieri & Pirrotta, 2008).</p> <p>Rb = Bifurcation Ratio Index, Nu = Number of streams of a given order, Nu + 1 = Number of streams of the next higher order (Guarnieri & Pirrotta, 200).</p>	
$Rbd(u - u + 1) = \frac{Ndu}{Nu + 1}$ <p>نسبت مستقیم انشعاب (Rbd) Direct Bifurcation Ratio (Rbd)</p> <p>Rbd = شاخص نسبت مستقیم انشعاب، Ndu = تعداد آبراهه‌های رتبه ویژه که به رتبه بالاتر جریان می‌یابد، Nu + 1 = تعداد آبراهه‌های رتبه بالاتر (Baroni et al, 2005).</p> <p>Rbd = Direct Bifurcation Ratio Index, Ndu = Number of streams of a given order draining directly into the next higher order, Nu + 1 = Number of streams of the next higher order (Baroni et al, 2005).</p>	
$R = Rb - Rbd$ <p>شاخص انشعابات (R) Anastomosis Index (R)</p> <p>R = شاخص انشعابات، Rb = نسبت انشعابات حوضه، Rbd = نسبت مستقیم انشعابات (Guarnieri & Pirrotta, 2008).</p> <p>R = Anastomosis Index, Rb = Bifurcation Ratio of the basin, Rbd = Direct Bifurcation Ratio (Guarnieri & Pirrotta, 2008).</p>	
$AF = \frac{AR}{AT} * 100$ <p>شاخص درصد عدم تقارن حوضه (AF) Percent of Basin Asymmetry</p> <p>AF = شاخص درصد عدم تقارن حوضه، AR = مساحت سمت بزرگتر رودخانه اصلی، AT = مساحت کل حوضه به کیلومتر مربع (Clement & Brook, 2008).</p> <p>AF = Percent Basin Asymmetry Index, AR = Area of the larger side of the main river, AT = Total basin area (km²) (Clement & Brook, 2008).</p>	
$BS = \frac{BL}{Bw}$ <p>شاخص نسبت شکل حوضه (BS) Basin Shape Ratio (BS)</p> <p>BS = شاخص کل حوضه، BL = اندازه طول حوضه از انتهای ترین مقسم آب تا خروجی حوضه، Bw = پهنای حوضه در پهن‌ترین قسمت (Burbank & Anderson, 2001).</p> <p>BS = Basin Shape Ratio Index, BL = Basin length (from the farthest divide to the outlet), Bw = Basin width at its widest point (Burbank & Anderson, 2001).</p>	
$LN1 = \frac{\sum L1}{N}$ <p>شاخص میانگین طول آبراهه درجه ۱ (LN1) Mean Length of First Order Streams (LN1)</p> <p>LN1 = شاخص میانگین طول آبراهه درجه ۱، $\sum L1$ = مجموع طول آبراهه درجه ۱، N = تعداد آبراهه درجه ۱ (Zuchiewicz, 1998).</p> <p>LN1 = Mean Length of 1st-Order Streams Index, $L1\sum$ = Total length of all 1st-order streams, N = Number of 1st-order streams (Zuchiewicz, 1998).</p>	

مدل‌سازی رگرسیون لجستیک: برای پیش‌بینی احتمال وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای، از مدل رگرسیون لجستیک استفاده شد. این مدل رابطه غیرخطی بین متغیرهای مستقل (عوامل مؤثر) و متغیر وابسته دوحالته (وقوع/عدم وقوع) را به صورت یک منحنی S شکل توصیف می‌کند (Dai & Lee, 2002; Rahimi, 2011). معادله (۱) شکل عمومی مدل رگرسیون لجستیک را نشان می‌دهد:

- 1-Basin Shape Ratio
- 2-Mean length of first order streams

$$P = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (۱)$$

که در آن P احتمال رویداد حادثه (در این پژوهش فرآیندهای دامنه‌ای) و Z پارامتر یا فاکتور خطی است و از رابطه (۲) بدست می‌آید، e نیز عدد ثابت ۲/۷۱۸ می‌باشد.

$$Z = \logit(p) = \ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = C_0 + C_1X_1 + \dots + C_nX_n \quad (۲)$$

C0 عرض از مبدأ یا ضریب ثابت مدل، و X_1, X_2, \dots, X_n ضرایب مربوط به متغیرهای مستقل، C_1, C_2, \dots, C_n هستند. با تغییر در مقدار Z از $-\infty$ تا $+\infty$ احتمال وقوع فرآیندهای دامنه‌ای (P) به صورت S از ۰ تا ۱ تغییر می‌کند. هر چه عدد به یک نزدیک‌تر باشد، احتمال وقوع فرآیندهای دامنه‌ای بیشتر و هر چه عدد به صفر نزدیک‌تر باشد، احتمال وقوع آن کمتر خواهد بود (Chau et al., 2004). مناطق با ناپایداری عدد ۱ و مناطق پایدار عدد ۰ دریافت کردند. داده‌ها به نرم‌افزار IDRISI وارد و تحلیل شدند.

۴) **اعتبارسنجی نتایج:** اعتبارسنجی نتایج با استفاده از روش‌های مختلفی ارزیابی شد. اولین روش، تطابق نقشه‌های پهنه‌بندی با مشاهدات میدانی بود. علاوه بر این، آزمون‌های آماری مختلفی نیز به کار گرفته شدند. در این راستا، آزمون کی دو (Chi-Square) برای رد فرضیه صفر در سطح اطمینان ۹۵٪ استفاده گردید (Motavali Sadraddin & Esmaeili, 2013). همچنین، شاخص ROC به منظور اندازه‌گیری میزان تطابق پیش‌بینی مدل با واقعیت، با مقدار مطلوب بالای ۰/۷ به کار رفت (Ayalew & Yamagishi, 2005). در نهایت، شبه R^2 (PR²) با ارزش بالای ۰/۲ به عنوان معیاری برای ارزیابی برازش مناسب مدل در نظر گرفته شد (Menard, 2002).

نتایج و بحث

درک روابط پیچیده، میان فرآیندهای زمین‌ساختی و عوامل ژئومورفولوژیکی، پیش‌نیاز تحلیل ناپایداری دامنه‌ها در محیط‌های تکتونیکی فعال است. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های سنجش از دور، تحلیل‌های میدانی و مدل‌سازی آماری، نقش شاخص‌های مورفوتکتونیک و زمین‌شناختی در پهنه‌بندی خطر ناپایداری دامنه‌ای در حوضه شهرچای ارومیه بررسی شد. تحلیل لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS، مدل‌سازی رگرسیون لجستیک و اعتبارسنجی آماری، چارچوبی منسجم برای تبیین رابطه میان پویایی‌های زمین‌ساختی و رفتار شبکه‌زهکشی ارائه می‌دهد. یافته‌های به‌دست‌آمده می‌توانند مبنایی برای برنامه‌ریزی کاهش خطر در مناطق مشابه باشند.

تحلیل تأثیرات تکتونیکی بر ناهنجاری‌های شبکه‌های زهکشی

شاخص‌های ژئومورفیک، ابزارهای کلیدی برای بررسی تأثیرات تکتونیکی بر هندسه دره‌ها و مسیر رودخانه‌ها محسوب می‌شوند. این شاخص‌ها با تمرکز بر آشکارسازی تغییرات ناگهانی در الگوهای زهکشی، جابجایی‌های آبراهه‌ای و ناهنجاری‌های ناشی از گسلش امکان تمایز میان اثرات تکتونیکی و فرآیندهای فرسایشی معمول را فراهم می‌سازند.

شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی (Δa): این شاخص یکی از معیارهای مهم در بررسی ساختار و نظم شبکه‌های زهکشی است که با هدف شناسایی اختلالات زمین‌ساختی و تکتونیکی در حوضه‌های آبریز به کار می‌رود. در این مطالعه، تعداد آبراهه‌ها بر اساس روش استرالر تعیین و نسبت تعداد کل آبراهه‌ها به تعداد آبراهه‌های درجه اول (Δa) محاسبه شد. در این مطالعه، مقدار Δa برابر با ۱/۳۴ محاسبه شد؛ به این معنا که نسبت کل آبراهه‌ها به آبراهه‌های مرتبه اول پایین‌تر از ساختار متوازن نظری است. این مسئله ممکن است نشان‌دهنده کمبود آبراهه‌های مرتبه اول در اثر تکتونیک فعال یا عوامل ژئومورفیک باشد. با توجه به عدم وجود مقادیر مرجع جهانی برای شاخص Δa ، تفسیر نتایج باید در قالب ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی، زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی منطقه انجام شود.

بنابراین، مقایسه این شاخص با داده‌های مشابه در مناطق دارای شرایط مشابه زمین‌شناسی و اقلیمی، ابزاری کاربردی برای تحلیل تحولات زمین‌ساختی و تأثیرات ژئودینامیکی محسوب می‌شود.

شاخص تراکم ناهنجاری سلسه مراتبی: این شاخص بیانگر تعداد ناهنجاری‌ها به ازای واحد سطح حوضه است. مقدار محاسبه شده در منطقه برابر با ۱/۳۳ است، که به معنی وجود بیش از یک ناهنجاری ساختاری به طور میانگین در هر کیلومتر مربع از حوضه می‌باشد. میزان بالای این شاخص معمولاً با شدت فعالیت‌های تکتونیکی مرتبط است.

شاخص نسبت انشعابات: شاخص نسبت انشعابات (Rb) از تقسیم تعداد آبراهه‌های یک مرتبه بر مرتبه بالاتر به دست می‌آید و معیاری برای ارزیابی نظم شبکه‌زهکشی است. مقدار میانگین Rb در منطقه ۱/۷۵ محاسبه شد که پایین‌تر از میانگین جهانی (۳ تا ۵) است. این مقدار می‌تواند نشان‌دهنده توسعه یافتگی شبکه یا تأثیر محدود تکتونیک باشد. همچنین، تغییرات لیتولوژیکی و اقلیم ممکن است در کاهش شاخص مؤثر باشند. مقایسه این شاخص با مناطق مشابه، ابزار مناسبی برای تحلیل نقش نیروهای زمین‌ساختی فراهم می‌کند.

شاخص نسبت انشعابات مستقیم: شاخص نسبت انشعابات مستقیم (Rbd) برای تحلیل دقیق‌تر پویایی شبکه‌زهکشی محاسبه شده و مقدار آن در منطقه ۰/۳۳ به دست آمده است. این شاخص نشان می‌دهد چه بخشی از آبراهه‌ها مستقیماً به مرتبه بالاتر متصل می‌شوند. شاخص کلی انشعابات (R) نیز با ترکیب Rb و Rbd برابر با ۱/۴۱ محاسبه شد. مقادیر پایین این شاخص‌ها حاکی از نظم نسبی شبکه و تأثیر محدود تکتونیک فعال است. با این حال، برخی ناهنجاری‌ها ممکن است بیانگر تأثیر زمین‌ساخت‌های موضعی باشند.

شاخص عدم تقارن حوضه‌زهکشی^۱ (فاکتور عدم تقارن): شاخص AF با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و محاسبه مساحت‌های جانبی رودخانه تعیین شد. مقدار به دست آمده برابر با ۵۴/۳۹ است که بیانگر تمایل جریان رودخانه به سمت چپ حوضه است. این نوع عدم تقارن می‌تواند ناشی از تأثیر حرکات جانبی گسل‌ها یا تغییرات ساختاری منطقه باشد.

نسبت شکل حوضه‌زهکشی: این شاخص که از نسبت طول به عرض حوضه محاسبه می‌شود، در منطقه مورد مطالعه برابر با ۵/۶۲ است. مقدار بالا نشان‌دهنده کشیدگی قابل توجه حوضه است که احتمالاً تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی، ساختار گسل‌ها یا عوامل مورفولوژیکی قرار دارد. چنین کشیدگی‌هایی معمولاً با جهت حرکت گسل‌ها هم‌راستا بوده و می‌توانند معیارهای غیرمستقیمی برای ارزیابی تنش‌های زمین‌ساختی باشند.

شاخص میانگین طول آبراهه درجه ۱: براساس داده‌های موجود، طول کل آبراهه‌های درجه اول برابر با ۵۲۹/۵۳۵ کیلومتر و تعداد آن‌ها حدود ۱۰۱۳ مورد است. بنابراین، میانگین طول هر آبراهه درجه اول ۰/۵۱۷ کیلومتر محاسبه شد. تغییر در این شاخص، در کنار سایر معیارهای ژئومورفیک، می‌تواند نشان‌دهنده تحولات ساختار هیدرولوژیکی منطقه باشد. در حوضه‌هایی با فعالیت تکتونیکی بالا، این شاخص معمولاً تحت تأثیر جابجایی‌های زمینی و شکستگی‌های بستر قرار می‌گیرد.

بررسی ارتباط عوامل تأثیرگذار بر وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای: نقشه پراکنش ناپایداری‌های دامنه‌ای اطلاعات ارزشمندی در خصوص موقعیت، نوع و شدت این پدیده‌ها در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهد. این نقشه‌ها، که از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ استخراج شده‌اند، مبنای تحلیل‌های بعدی جهت شناسایی عوامل مؤثر بر ناپایداری و مدیریت خطر محسوب می‌شوند (Van Westen, 2008). در این پژوهش، با استفاده از تصاویر لندست سال ۲۰۲۳، مناطق مستعد ناپایداری شناسایی شدند. نقشه نهایی، پس از تحلیل‌های پردازشی در نرم‌افزار Idrisi، نشان داد که حدود ۴۲/۴ کیلومتر مربع از سطح منطقه (معادل ۰/۶۱٪) دچار ناپایداری‌های دامنه‌ای شده‌اند.

تأثیر ارتفاع: برای تحلیل تأثیر ارتفاع بر ناپایداری‌های دامنه‌ای، از مدل رقومی ارتفاع (DEM) استفاده شد و محدوده ارتفاعی منطقه مطالعه بین ۱۲۶۸ تا ۳۵۹۶ متر به پنج طبقه ارتفاعی تقسیم گردید. نتایج نشان داد که بیشترین ناپایداری‌های دامنه‌ای در طبقات ارتفاعی پایین‌تر (۱۲۶۸ تا ۲۰۰۰ متر) متمرکز هستند. کاهش فراوانی ناپایداری‌ها در ارتفاعات بالاتر را می‌توان به چند عامل نسبت داد. در ارتفاعات پایین‌تر، فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی، جاده‌سازی و ساخت‌وساز بیشتر است که به واسطه تغییرات کاربری زمین و تخریب پوشش گیاهی، ریسک ناپایداری دامنه‌ها افزایش می‌یابد. در ارتفاعات بالاتر، این فعالیت‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و پوشش گیاهی غالباً متراکم‌تر و سالم‌تر است که نقش تثبیت‌کننده در پایداری خاک ایفا می‌کند. علاوه بر این، شیب دامنه‌ها در ارتفاعات بالاتر گرچه ممکن است تند باشد، اما به دلیل ویژگی‌های زمین‌شناسی و ساختاری منطقه، پایداری نسبی بیشتری مشاهده می‌شود. شرایط اقلیمی، نوع خاک و عوامل محیطی دیگر نیز در توزیع ناپایداری‌های دامنه‌ای تأثیرگذار هستند.

تأثیر شیب دامنه: در این مطالعه، به‌منظور بررسی رابطه شیب با ناپایداری دامنه‌ای، نقشه شیب به پنج طبقه تقسیم‌بندی شد. نتایج حاصل از تحلیل آماری داده‌ها نشان داد که بیشترین تراکم ناپایداری دامنه‌ای در محدوده شیب‌های ۵ تا ۲۰ درصد مشاهده شده است. این محدوده‌ها معمولاً در نواحی با فعالیت‌های انسانی گسترده مانند کشاورزی شیب‌دار، ساخت‌وساز و تخریب پوشش گیاهی قرار دارند. چنین فعالیت‌هایی با کاهش مقاومت برشی مواد سطحی، پتانسیل ناپایداری دامنه را افزایش می‌دهند. در عین حال، در شیب‌های بالاتر نیز ناپایداری دامنه‌ای مشاهده شده است، به‌ویژه در مناطقی که دارای سازندهای زمین‌شناسی ناپایدار نظیر مارن‌ها، شیل‌ها و نهشته‌های سست آبرفتی هستند. این مسئله نشان می‌دهد که علاوه بر شیب، نوع سنگ بستر و ویژگی‌های ژئومورفولوژیک نقش مهمی در تحریک ناپایداری ایفا می‌کنند.

تأثیر جهت‌شیب: تحلیل جهت شیب دامنه‌ها با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) نشان داده است که دامنه‌هایی با جهت‌های جنوبی و جنوب‌شرقی بیشترین میزان ناپایداری را تجربه می‌کنند. این پدیده به‌ویژه در مناطقی با پوشش گیاهی کم و خاک‌های با بافت سبک‌تر برجسته‌تر است. دامنه‌های جنوبی به دلیل دریافت بیشتر تابش خورشیدی، معمولاً دارای نرخ بالاتری از تبخیر و خشکی سطحی خاک هستند که می‌تواند منجر به کاهش پیوستگی ذرات خاک و تسریع فرآیندهای ناپایداری شود. در مقابل، دامنه‌های شمالی که تابش مستقیم کمتری دریافت می‌کنند، گرچه رطوبت بیشتری دارند، اما تحت تأثیر چرخه‌های انجماد و ذوب مکرر قرار دارند که می‌توانند ساختار خاک را تضعیف کرده و ترک‌های ریز ایجاد کنند. تحلیل نقشه جهت‌شیب که بر اساس هشت طبقه اصلی جهت (شمال، شمال‌شرق، شرق، جنوب‌شرق، جنوب، جنوب‌غرب، غرب و شمال‌غرب) انجام شده است، ارتباط معناداری بین جهت شیب و توزیع مکانی ناپایداری‌های دامنه‌ای نشان داده است. این نتایج بیانگر نقش تعیین‌کننده جهت شیب، به‌ویژه در تعامل با پارامترهای دیگر مانند شیب دامنه، نوع خاک، شرایط اقلیمی و کاربری زمین در پایداری دامنه‌ها است.

تأثیر فاصله از گسل‌ها: در بررسی تأثیر فاصله از گسل‌ها بر ناپایداری‌های دامنه‌ای، مشخص شد که بیشترین ناپایداری‌های دامنه‌ای در فاصله کمتر از ۱۰۰۰ متر از گسل‌های فعال رخ می‌دهند. این امر به دلیل شکستگی‌ها، کاهش مقاومت مکانیکی و افزایش نفوذپذیری سنگ‌ها در اطراف گسل‌هاست. گسل‌ها با ایجاد تغییر در ساختار زمین، شرایطی فراهم می‌کنند که پایداری دامنه‌ها کاهش یابد. با دور شدن از گسل‌ها، اثرات لرزه‌ای و تکتونیکی کاهش یافته و احتمال ناپایداری نیز کمتر می‌شود.

تأثیر فاصله از رودخانه‌ها: با تحلیل پراکندگی ناپایداری‌های دامنه‌ای نسبت به فاصله از رودخانه‌ها، مشخص شد حدود ۸۷ درصد از این ناپایداری‌ها در فاصله کمتر از ۳۰۰۰ متر از رودخانه‌ها رخ داده‌اند. این پدیده عمدتاً به دلیل فرسایش کناری رودخانه‌هاست که باعث کاهش مقاومت خاک، تضعیف پایه دامنه و افزایش تنش‌های برشی می‌شود. جریان آب موجب تخریب لایه‌های سطحی خاک و کاهش انسجام آنها شده و شرایط مناسب برای لغزش و سایر ناپایداری‌ها را فراهم می‌کند. همچنین، نزدیکی به رودخانه معمولاً با شیب‌های تندتر و تغییرات مورفولوژیکی همراه است که نقش مهمی در افزایش ناپایداری‌ها دارد.

تأثیر فاصله از جاده‌ها: برای بررسی رابطه بین فاصله از جاده‌ها و وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای، داده‌ها در پنج دسته فاصله‌ای طبقه‌بندی شدند که نتایج نشان داد بیش از ۹۰٪ از ناپایداری‌ها در فاصله کمتر از ۲۰۰۰ متر از جاده‌ها رخ می‌دهند. این موضوع بیانگر تأثیر قابل توجه فعالیت‌های مرتبط با جاده‌سازی بر افزایش خطر ناپایداری است که عمدتاً ناشی از تخریب پوشش گیاهی، تغییر ساختار خاک شامل تراکم و کاهش نفوذپذیری، و تغییر در جریان‌های سطحی و زیرسطحی آب به دلیل تغییرات توپوگرافی و ایجاد کانال‌ها می‌باشد. در مقابل، در فواصل دورتر از جاده‌ها به دلیل حفظ پوشش گیاهی و ساختار طبیعی خاک، احتمال وقوع ناپایداری‌ها به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

تأثیر لیتولوژی: تلفیق نقشه لیتولوژی با نقشه ناپایداری‌های دامنه‌ای نشان می‌دهد که بیشترین ناپایداری‌ها (حدود ۰/۴۳٪) در سنگ‌های با مقاومت متوسط تا بالا رخ داده است. برای تهیه نقشه لیتولوژی از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شده و واحدهای لیتولوژیکی مختلف بر اساس آن تعریف گردید. مطابق مطالعات پیروان و شریعت جعفری (Peyrowan & Shariat, 2013)، حساسیت و مقاومت هر واحد سنگی در برابر فرسایش بررسی و سنگ‌ها بر اساس فرسایش‌پذیری به هشت گروه لیتولوژیکی طبقه‌بندی شدند. در منطقه مورد مطالعه، سازند قم شامل مزودپوریت، گرانودیوریت، تناوب کنگلومرا، توف و ماسه‌سنگ است که با مساحتی حدود ۳۱/۶۳ کیلومتر مربع (معادل ۱۰/۱۹٪ از کل منطقه) دارای لیتولوژی مقاوم بوده و ناپایداری کمتری نشان می‌دهد. سازند روته، متشکل از شیست، سنگ‌های آتشفشانی، همتافت سیلوانا و ماسه‌سنگ آهکی، با مساحتی حدود ۲۷۱/۸۰ کیلومتر مربع (۴۳/۱۳٪ از منطقه) دارای لیتولوژی متوسط تا مقاوم است. سازند دولومیت سلطانیه با ۵۴/۳۹ کیلومتر مربع (۱۹/۲۱٪ از منطقه) شامل توف آندزیت، سنگ‌های آتشفشانی دگرگون‌شده متوسط و شیست است که لیتولوژی متوسطی دارد. همچنین، سازند ماسه‌سنگ دانه‌درشت با مساحتی برابر ۱۳۹/۱۱ کیلومتر مربع (۲۰/۳۹٪ از منطقه) دارای لیتولوژی متوسط تا ضعیف است. علاوه بر این سازندهای سنگی، نهشته‌های مخروط‌افکنه‌ای (جوان و قدیمی)، پادگانه‌های آبرفتی جوان، خاک‌های باقیمانده و اراضی کشاورزی به مساحت تقریبی ۲۱۷/۷۶ کیلومتر مربع (۷/۰۵٪ از کل منطقه) در دسته لیتولوژی‌های متوسط تا ضعیف قرار گرفته‌اند که می‌توانند عامل افزایش ناپایداری‌های دامنه‌ای باشند.

تأثیر پوشش گیاهی: در این مطالعه، به‌منظور بررسی پوشش گیاهی از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ با سنجنده OLI استفاده شد. ابتدا مقادیر دیجیتالی هر پیکسل به رادیانس تبدیل شده و سپس با به‌کارگیری الگوریتم تصحیح اتمسفری FLAASH، بازتاب سطح زمین اصلاح گردید. این بازتاب‌ها در قالب داده‌های عددی بین صفر و یک نرمال‌سازی شدند تا امکان محاسبه شاخص پوشش گیاهی فراهم شود. شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) به عنوان معیاری برای سنجش تراکم پوشش گیاهی مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر بالای این شاخص بیانگر مناطق با پوشش گیاهی متراکم و مقادیر پایین یا منفی نشان‌دهنده نواحی فاقد پوشش گیاهی هستند. نتایج این بررسی نشان داد که مناطق فاقد پوشش گیاهی بیشترین ناپایداری‌های دامنه‌ای را تجربه کرده‌اند. بررسی تلفیقی نقشه پوشش گیاهی و نقشه ناپایداری‌های دامنه‌ای مشخص کرد که تمام ناپایداری‌های ثبت شده در مناطق بدون پوشش گیاهی اتفاق افتاده‌اند. این موضوع نشان‌دهنده ارتباط مستقیم کاهش پوشش گیاهی با افزایش آسیب‌پذیری زمین در برابر فرسایش و ناپایداری‌های دامنه‌ای است. کاهش پوشش گیاهی منجر به کاهش انسجام خاک، افزایش فرسایش سطحی و تسهیل وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای می‌شود.

تأثیر پوشش زمین: بر اساس تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و طبقه‌بندی پوشش زمین، مشخص شد که نواحی با پوشش گیاهی کم تراکم یا فاقد پوشش مناسب، بیشترین حساسیت را در برابر ناپایداری‌های دامنه‌ای دارند. این مناطق، به دلیل کاهش تثبیت خاک ناشی از پوشش گیاهی ناکافی، در معرض افزایش فرسایش سطحی و ناپایداری‌های زمین‌شناختی مانند ناپایداری‌های دامنه‌ای قرار دارند. کاهش پوشش گیاهی موجب تسهیل فرسایش و کاهش پایداری خاک شده و در نتیجه احتمال وقوع فرآیندهای ناپایدار دامنه‌ای در این نواحی افزایش می‌یابد.

نتایج مدل رگرسیون لجستیک پهنه‌بندی حساسیت به ناپایداری‌های دامنه‌ای

در این پژوهش، به منظور تحلیل عوامل مؤثر بر ناپایداری‌های دامنه‌ای در حوضه آبریز شهرچای، داده‌های مربوط به ۹ متغیر مستقل شامل فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، لیتولوژی، پوشش گیاهی، شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی و پوشش زمین جمع‌آوری و پس از پردازش به نرم‌افزار Idrisi وارد شد. مدل رگرسیون لجستیک برای پیش‌بینی احتمال وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای به کار گرفته شد (جدول ۲). مدل رگرسیون لجستیک به‌عنوان روشی مناسب برای مدل‌سازی احتمال وقوع رویدادهای باینری (وقوع یا عدم وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای) به کار گرفته شد. این مدل رابطه آماری بین متغیرهای مستقل و احتمال رخداد ناپایداری‌های دامنه‌ای را تعیین می‌کند. معادله نهایی مدل (۳) به شکل زیر است:

جدول ۲- ضرائب حاصل از مدل رگرسیون لجستیک

Table 2- Coefficients Derived from the Logistic Regression Model

	متغیرهای مستقل Independent Variables	ضرائب Coefficients
X ₀	عدد ثابت Constant Number	-9/5400
X ₁	فاصله از گسل Distance to fault	0/23819
X ₂	فاصله از جاده Distance to road	0/524297
X ₃	فاصله از رودخانه Distance to river	-0/188468
X ₄	لیتولوژی Lithology	-0/161814
X ₅	پوشش گیاهی Vegetation	0/141
X ₆	شیب Slope	-0/398539
X ₇	جهت شیب Slope Direction	0/505626
X ₈	طبقات ارتفاعی Elevation classes	-0/008911
X ₉	پوشش زمین land cover	-0/036615

(۳)

$$\text{logit(Land slide)} = -9.5400 + (0.237819 * X_1) + (0.524297 * X_2) + (-0.188468 * X_3) + (-0.161814 * X_4) + (0.141 * X_5) + (-0.398539 * X_6) + (0.505626 * X_7) + (-0.008911 * X_8) + (-0.036615 * X_9)$$

ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌های آماری استاندارد شامل آزمون کای‌دو (Chi-Square)، شبه‌ضریب تعیین (Pseudo R²) و سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) انجام شد (جدول ۳).

مقدار آماره آزمون کای‌دو برابر با ۴۸ / ۱۰۹۳۰ به دست آمد که به‌طور معناداری بیشتر از مقدار بحرانی در سطح اطمینان ۹۹ درصد است (P < 0.001). این نتیجه بیانگر آن است که: مدل به‌صورت کلی معنی‌دار بوده و فرض صفر مبنی بر عدم وجود رابطه

میان متغیرهای مستقل و وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای رد می‌شود. به عبارت دیگر، حداقل یکی از متغیرهای مستقل تأثیر معناداری بر متغیر وابسته دارد.

شبه‌ضریب تعیین (Pseudo R²) از نوع برابر با ۰/۳۱۳۳ محاسبه شد که نشان‌دهندهٔ برازش نسبتاً مناسب مدل است. با توجه به ماهیت مدل‌های لجستیک، مقادیر Pseudo R² معمولاً کمتر از ضریب تعیین در رگرسیون‌های خطی هستند؛ با این حال، مقدار به‌دست‌آمده حاکی از قابلیت قابل قبول مدل در توضیح داده‌هاست.

همچنین مقدار سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) برابر با ۰/۹۲۲۳ محاسبه گردید. این مقدار که به عدد ۱ بسیار نزدیک است، نشان‌دهندهٔ توانایی بالای مدل در تمایز میان مناطق دارای ناپایداری‌های دامنه‌ای و مناطق فاقد آن است. در نتیجه، مدل ارائه شده از کارایی بالایی در پیش‌بینی ناپایداری‌های دامنه‌ای در منطقه‌ی مورد مطالعه برخوردار است.

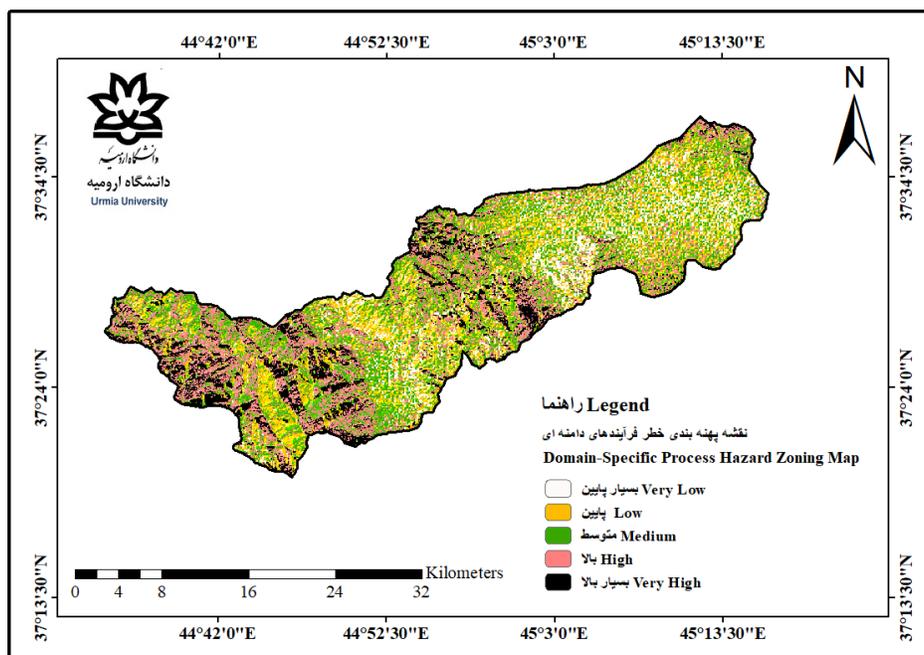
با استفاده از ضرایب محاسبه شده و مدل ارائه شده، نقشه حساسیت ناپایداری دامنه‌ها در حوضه شهرچای تهیه گردید (شکل ۲). این نقشه، مناطق مورد مطالعه را به پنج دسته حساسیت شامل «بسیار بالا»، «بالا»، «متوسط»، «کم» و «بسیار کم» تقسیم‌بندی می‌کند. تحلیل فضایی نتایج نشان می‌دهد که مناطق با حساسیت بسیار بالا از نظر مساحت محدود هستند (شکل ۳)، اما این نواحی با ویژگی‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی مانند شیب‌های تند، مجاورت با مسیرهای ارتباطی و پوشش گیاهی کم تراکم هم‌خوانی دارند. این توزیع فضایی نامتقارن، تمرکز مخاطره ناپایداری دامنه‌ای را در مناطق مشخصی تأیید می‌کند.

برای صحت‌سنجی مکانی مدل، تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالای و داده‌های میدانی مورد استفاده قرار گرفت. تطابق مکانی میان مناطق پرخطر شناسایی شده و ناپایداری دامنه‌ای واقعی، مؤید دقت بالای مدل و قابلیت اعتماد نقشه حساسیت تولید شده است.

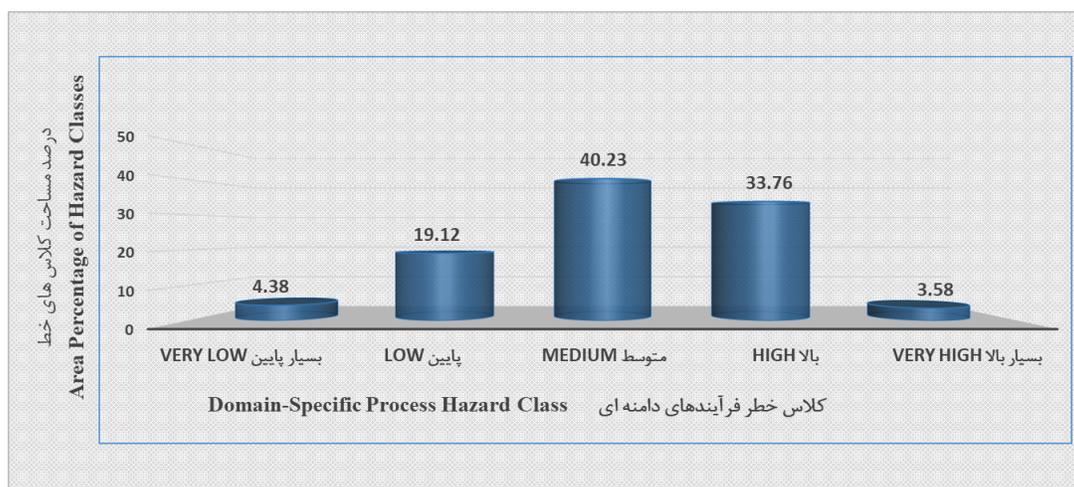
جدول ۳- شاخص‌های اعتبار سنجی مدل آماری رگرسیون لجستیک

Table 3 – Validation Indicators of the Logistic Regression Statistical Model

مقدار به دست آمده Observed Value	مقدار استاندارد Standard Value	شاخص Indicator
10930/4795	>14/1	Chi Square
0/3133	>0/2	Pseudo R Square
0/9223	1>0/5	ROC



شکل ۲- نقشه پهنه‌بندی ناپایداری دامنه‌ای به روش رگرسیون لجستیک
Fig.2. Landslide Susceptibility Zoning Map Using the Logistic Regression Method



شکل ۳- نمودار مساحت تحت اشغال کلاس‌های خطر در روش رگرسیون لجستیک
Fig.3. Area Occupied by Hazard Classes Based on the Logistic Regression Method

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی رابطه بین فرآیندهای تکتونیکی و ژئومورفولوژیکی و ناپایداری‌های دامنه‌ای در حوضه آبریز شهرچای ارومیه انجام شد. نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها نشان داد که فعالیت‌های زمین‌ساختی، به‌ویژه حضور و فعالیت گسل‌های فعال (گسل‌های فعال شامل گسل دریاچه ارومیه، گسل‌های شمال و جنوب سلماس، گسل اشنویه، گسل کوه شهیدان) در منطقه، نقش اساسی و تعیین‌کننده‌ای در افزایش ریسک وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای دارند. شاخص‌های مورفوتکتونیکی مانند ناهنجاری

سلسله‌مراتبی آبراهه‌ها (Δa)، تراکم ناهنجاری‌ها (ga) و نسبت انشعابات (Rb) همبستگی معنی‌داری با پراکندگی ناپایداری دامنه‌ای نشان دادند که بیانگر تأثیر مستقیم تحرکات زمین‌ساختی بر شکل‌گیری و توسعه ناپایداری‌های سطحی است.

از سوی دیگر، بررسی عوامل انسان‌ساخت مؤید تأثیر منفی فعالیت‌های توسعه‌ای در کاهش پایداری دامنه‌ها بود. ساخت و توسعه راه‌های ارتباطی، تغییرات گسترده در کاربری‌اراضی و تخریب پوشش گیاهی به طور محسوس پتانسیل وقوع ناپایداری دامنه‌ای را افزایش داده‌اند؛ به طوری که تقریباً ۹۰ درصد از رویدادهای ناپایداری دامنه‌ای در مجاورت جاده‌ها و مناطق فاقد پوشش گیاهی مناسب رخ داده است. این نکته، اهمیت نقش دخالت‌های انسانی در تشدید ناپایداری‌های دامنه‌ای را برجسته می‌سازد.

در این مطالعه، مدل رگرسیون لجستیک به عنوان ابزار اصلی تحلیل مورد استفاده قرار گرفت که با دقت بالایی (ضریب $ROC = 0.922$) توانست عوامل کلیدی مؤثر بر وقوع ناپایداری دامنه‌ای را شناسایی نماید. متغیرهایی همچون ارتفاع، شیب، فاصله از گسل‌ها و رودخانه‌ها و نوع پوشش گیاهی به ترتیب بیشترین تأثیر را بر وقوع ناپایداری داشتند. تحلیل پهنه‌بندی خطر نشان داد که بیش از ۸۷ درصد ناپایداری دامنه‌ای در فاصله کمتر از ۳۰۰۰ متر از شبکه‌های آبراهه‌ای اتفاق افتاده‌اند و عمدتاً در ارتفاعات بین ۱۲۶۸ تا ۲۰۰۰ متر با شیب‌های ملایم تا متوسط (۵ تا ۲۰ درصد) تمرکز یافته‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که توزیع فضایی و ویژگی‌های توپوگرافیکی و زمین‌شناسی در تعیین ریسک ناپایداری دامنه‌ای نقش مهمی دارند.

یافته‌های این پژوهش بر ضرورت اتخاذ رویکردی جامع و بین‌رشته‌ای در مدیریت ریسک ناپایداری‌های دامنه‌ای تأکید دارند. با توجه به تأثیرات همزمان عوامل زمین‌ساختی و انسان‌ساخت، توصیه می‌شود اقدامات حفاظتی شامل احیای پوشش گیاهی بومی و طبیعی، اعمال محدودیت‌های ساخت‌وساز در شیب‌های بحرانی، کنترل فعالیت‌های عمرانی در مناطق حساس و توسعه پروژه‌های آبخیزداری به عنوان سیاست‌های اولویت‌دار در برنامه‌های مدیریت منابع طبیعی و محیط‌زیست در نظر گرفته شوند.

در نهایت، نتایج به دست آمده قابلیت تعمیم به سایر حوضه‌های کوهستانی با ویژگی‌های زمین‌ساختی و ژئومورفولوژیکی مشابه در ایران را دارند. این پژوهش می‌تواند به عنوان مبنایی علمی و کاربردی برای طراحی و اجرای برنامه‌های کاهش مخاطرات ناپایداری‌های دامنه‌ای و بهبود راهبردهای مدیریت بحران و محیط‌زیست در مناطق کوهستانی کشور مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر با بهره‌گیری از داده‌های لیدار، سنجش‌ازدور، و پایش بلندمدت تغییرات مورفولوژیکی، می‌تواند مسیر تحقیقات آتی را شکل دهد.

References

- Asghari Sareskanrood, S., Mohammadzadeh Shishegaram, M., & Asghari Sareskanrood, S. (2022). Zoning and estimation of range movements in Hashtroud city using radar interferometry and MABAC model. *Environmental Management Hazards*, 9(2), 133-150. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jhsci.2022.346994.736>
- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1-2), 15-31. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010>
- Babolimoakher, H. (2022). Investigation the relationship between frequency of landslide with active tectonic, based on morphotectonic indices in Fahlian River Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 14(2), 243-259. [In Persian] https://jwem.areeo.ac.ir/article_125162.html
- Baharvand, S., & Soori, S. (2016). Landslide hazard zonation using artificial neural network (Case study: Sepiddasht-Lorestan, Iran). *Journal of RS and GIS for Natural Resources (Journal of Applied RS and GIS Techniques in Natural Resource Science)*, 6(4), 15-31. [In Persian]

- Baroni, C., Noti, V., Ciccacci, S., Righini, G., & Salvatore, M. C. (2005). Fluvial origin of the valley system in northern Victoria Land (Antarctica) from quantitative geomorphic analysis. *Geological Society of America Bulletin*, 117(1-2), 212-228. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2003.08.013>
- Burbank, D. W., & Anderson, R. S. (2011). *Tectonic Geomorphology*. Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.19.2.198>
- Chau, K. T., Sze, Y. L., Fung, M. K., Wong, W. Y., Fong, E. L., & Chan, L. C. P. (2004). Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS. *Computers & Geosciences*, 30(4), 429-443. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2003.08.013>
- Ciccacci, S., Fredi, P., Lupia Palmieri, E., & Pugliese, F. (1987). Indirect evaluation of erosion entity in drainage basins through geomorphic, climatic and hydrological parameters. *International Geomorphology*, 2, 233-219. <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.3909.1843>
- Clement, A. J., & Brook, M. S. (2008). Tilting of active folds and drainage asymmetry on the Manawatu anticlines, New Zealand: a preliminary investigation. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 33(11), 1787-1795. <https://doi.org/10.1002/esp.1632>
- Dai, F. C., & Lee, C. F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42(3-4), 213-228. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00087-3)
- Esfandiari Darabad, F. (2008). Landslide hazard zoning of Ardabil-Astara communication road using GIS. *Quarterly Geographical Journal of Territory*, 5(18), 113-124. [In Persian] <https://sanad.iau.ir/Journal/sarzamin/Article/823981>
- Guarnieri, P., & Pirrotta, C. (2008). The response of drainage basins to the late Quaternary tectonics in the Sicilian side of the Messina Strait (NE Sicily). *Geomorphology*, 95(3-4), 260-273. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Hemmati, F. & Mokhtari, D. (2018). Risk assessment model using artificial neural networks Benaravan fault domain instabilities (MLP). *Quantitative Geomorphological Research*, 7(1), 74-89. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1397.7.1.6.0>
- Hemmati, F., & Mokhtari, D. (2018). Zonation of the susceptibility of Banarvan Fault area to slope instability using Fuzzy AHP model. *Journal of Physical Geography*, 11 (42), 15-34. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085656.1397.11.42.2.0>
- Keller, A. E., & Pinter, N. (2002). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*. New Jersey: Prentice Hall.
- Khezri, S., Roostaei, S., & Radjaei Asl, A. (2006). Evaluation and slope instability risk zonation in central section of Zab basin (Sardasht township) by Anbalagan method. *The Journal of Spatial Planning and Geomatics*, 10(1), 49-80. [In Persian] <http://hsmmp.modares.ac.ir/article-21-695-fa.html>
- Kiani, T., & Yousefi, Z. (2018). Effect of active faults in the groundwater level of Shaharchay Basin in Urmia. *Journal of Geographical Sciences*, 17(47), 61-75. [In Persian] <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-2682-en.pdf>
- Malekzadeh, T., Sharifi, J., & Elyasi, E. (2005). Earthquake hazard assessment in western Azerbaijan regions (Urmia County). Paper presented at the Proceedings of the First Conference on Earthquake in Dorud - Past, Present, Future, Dorud, Iran. [In Persian] <https://civilica.com/doc/4291>
- Menard, S. (2001). *Applied Logistic Regression Analysis*. SAGE publications.
- Moghimi, E., Alavi Panah, S. K., & Jafari, T. (2008). Evaluation and Zonation of Effective Factors on Landslide Occurrence of Aladagh Northern Slopes. *Physical Geography Research*, 0(63), 53-75. [In Persian] https://jphgr.ut.ac.ir/article_26906.html?
- Motavali Sadraddin, M., & Esmaeili, R. (2013). Landslide hazard zoning using gamma fuzzy operator (A case study: Taleghan watershed). *Environmental Erosion Research*, 2(4), 1-20. [In Persian] <http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-178-fa.html>

- Negaresh, H., Faizi, V., Hodaei, A. A., Mollashahi, M., & Shahhiseini, M. (2013). Zoning of Mass Movement Occurrence Hazard in West Azarbaijan Province. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 2(3), 29-43. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/jneh.2013.2460>
- Nikjoo, M., Boromand, R., Roostaei, S., & Amirahmadi, A. (2018). Network Analysis of Factors Affecting Binalod Range Range Instability with Environmental Management Approach (Case study: North and South slopes). *Quantitative Geomorphological Research*, 6(2), 45-63. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1396.6.2.4.3>
- Peyrowan, H. R., & Shariat Jafari, M. (2013). Presentation of a comprehensive method for determining erodibility rate of rock units with a review on Iranian geology. *Watershed Engineering and Management*, 5(3), 199-213. [In Persian] https://jwem.areeo.ac.ir/article_101843.html
- Rafiei, M., Asadian, F., & Ahmadi, J. Y. (2015). Investigation role of tectonics and lithology on slope instability in the highlands north of Orumieh Lake using GIS (A case study of the north basin of water spreading schemes Tasuj). *Territory*, 46, 23-40. [In Persian] <https://sanad.iau.ir/fa/Article/823730>
- Rahimi, H. (2011). Spatio-temporal modeling of land cover changes using integration of Markov chain analysis, artificial neural networks, and cellular automata. (Master's thesis), University of Tabriz. [In Persian]
- Roostaei, S., & Khodaei, F. (2016). The zoning of slope instabilities on the mountain roads by artificial neural network (MLP) (Case study: Dare Diz Strait). *Physical Geography Quarterly*, 33, 19-35. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085656.1395.9.33.2.8>
- Roostaei, S., Mokhtari, D., & khodaiaie, F. (2015). The application of Logistic Regression in the zoning of slope instabilities on the mountain roads (case study: dare diz strait). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 4(6), 89-103. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/jneh.2016.2525>
- Sharifi, R., Solgi, A., & Pourkermani, M. (2013). A study of the relationship between landslide and active tectonic zones: a case study in Karaj Watershed management. *Open Journal of Geology*, 3(3), 233-239. <http://dx.doi.org/10.4236/ojg.2013.33027>
- Shi, X., & Hu, X. (2023). Characterization of landslide displacements in an active fault zone in Northwest China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 48(10), 1926-1939. <https://doi.org/10.1002/esp.5594>
- Shirani, K. (2018). On the Efficiency of Geomorphometric Parameters in Increasing the Accuracy of the Landslide Zoning Maps (Case Study: Dezolia Basin, Isfahan Province). *Geography and Environmental Planning*, 29(3), 111-130. [In Persian] <https://doi.org/10.22108/gep.2017.104440.1047>
- Skilodimou, H. D., Bathrellos, G., Antoniou, V., Koukouvelas, I., & Nikolakopoulos, K. (2022). A GIS-based study of factors related to landslides events in a tectonic active area. Paper presented at the 10th International Conference on Geomorphology, Coimbra, Portugal, ICG2022-555. <https://doi.org/10.5194/icg2022-555, 2022>
- Valizadeh Kamran, K., & Hashemzadeh, N. (2022). Zoning the risk of slope instability in Garmi city by fuzzy ANP method. *Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 2(2), 20-1. [In Persian] https://rsgi.tabrizu.ac.ir/article_14792.html?
- Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering geology*, 102(3-4), 112-131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Zuchiewicz, W. (1998). Quaternary tectonics of the outer West Carpathians, Poland. *Tectonophysics*, 297(1-4), 121-132. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00226-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00226-1)



Landslide Susceptibility Modelling Using Artificial Neural Network Algorithm: A Case Study of the Shahid Abbaspour Dam Catchment, Northeastern Khuzestan

Mahshid Moavi ¹, Heeva Elmizadeh ^{2*}, Mojgan Entezari ³

¹ Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

^{2*} Department of Marine Geology, Faculty of Marine Natural Resources, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran

³ Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 26 March 2025

Revised: 09 June 2025

Accepted: 11 June 2025

Available Online: 12 June 2025

Keywords:

Landslide Susceptibility Mapping

Artificial Neural Network (ANN)

Geographic Information System (GIS)

Remote Sensing

Shahid Abbaspour Dam Watershed

Southwest of Iran

Landslides are natural hazards that pose significant risks to human lives and the environment. Landslide susceptibility maps are vital tools for planning, management, and risk-reduction strategies. Various methods exist for generating these maps, but their effectiveness varies across studies. This research aimed to develop a landslide susceptibility map for the Shahid Abbaspour Dam watershed using an Artificial Neural Network (ANN). Landslide data points were randomly split into a 70% training and 30% testing dataset. Fifteen influencing factors were selected as model inputs, including elevation, slope, aspect, curvature, Stream Power Index (SPI), Topographic Wetness Index (TWI), distance to roads and rivers, geology, soil texture, land use, and precipitation. Model validation was performed using accuracy metrics and statistical indices (RMSE, Cohen's Kappa, MAE, and R²). The ANN model demonstrated strong predictive performance, achieving an accuracy of 0.8543. The study identified rivers as the most critical factor influencing landslide susceptibility in the area, followed by slope and geological formations. The highest susceptibility zones were found in the southwest and in a small northern section of the watershed. The resulting map provides valuable support for land-use planning and sustainable development strategies aimed at mitigating landslide risks in the region.

*Corresponding author: Dr. Heeva Elmizadeh

E-mail address: elmizadeh@kmsu.ac.ir

How to cite this article: Moavi, M., Elmizadeh, H., & Entezari, M. (2025). Landslide Susceptibility Modelling Using Artificial Neural Network Algorithm: A Case Study of the Shahid Abbaspour Dam Catchment, Northeastern Khuzestan. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 38-54. <https://doi.org/10.22067/geoeH.2025.92634.1557>



©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 rank among the most destructive natural hazards, endangering human lives, infrastructure, and the natural environment across the globe. In Iran, the northeastern part of Khuzestan Province, including the Shahid Abbaspour Dam watershed, is especially prone to landslides due to its mountainous topography, diverse geological formations, and seasonal rainfall patterns. Landslide susceptibility maps, which estimate the likelihood of occurrence based on local terrain and environmental conditions, are critical tools for planners, engineers, and policymakers. These maps guide land-use decisions, infrastructure development, and disaster preparedness, thereby reducing potential impacts on communities and ecosystems. Various methods, ranging from statistical models to machine learning techniques, have been employed to create such maps, each with varying degrees of accuracy and applicability. However, few studies have applied advanced machine learning approaches, such as Artificial Neural Networks (ANNs), in the Shahid Abbaspour Dam watershed, a critical area within the Greater Karun watershed. This research fills this gap by modeling landslide susceptibility in the region using an ANN, a method known for its ability to handle complex, non-linear relationships among multiple variables. The objective of this study is to produce a reliable susceptibility map to support risk mitigation, land-use planning, and sustainable development in this environmentally sensitive area. By leveraging the ANN's predictive power, this study offers a robust, scientifically grounded approach to addressing a pressing regional challenge, contributing to the broader field of geohazard assessment.

Material and Methods

The study focuses on the Shahid Abbaspour Dam watershed, located in northeastern Khuzestan. This area, part of the Greater Karun watershed, features rugged terrain, diverse geology, and a history of landslide activity, making it ideal for susceptibility analysis. Our methodology was conducted in five comprehensive stages to assess the probability of landslides based on local conditions. First, we conducted an extensive literature review to identify relevant factors and gathered data from multiple sources. Second, we selected and prepared 15 influencing factors as spatial layers: elevation, slope gradient, slope aspect, curvature, Stream Power Index (SPI), Topographic Wetness Index (TWI), distance from roads, distance from rivers, proximity to faults, geological formations, soil texture, land-use patterns, precipitation, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and seismic activity. These datasets were derived from 1:50,000-scale topographic maps, 1:100,000-scale geological maps, and a 30-meter resolution Digital Elevation Model (DEM) from ASTER satellite imagery. In the third stage, we implemented an Artificial Neural Network (ANN) in the R programming environment using the *nnet* package. This machine learning approach excels at capturing non-linear patterns among variables, making it suitable for landslide prediction. The ANN was configured with a single hidden layer of 10 neurons, trained with 70% of the dataset, and tested with the remaining 30%. The fourth stage involved generating a landslide susceptibility map, classifying the area into zones of varying risk. Finally, we validated the model using a suite of performance metrics: accuracy, Root Mean Square Error (RMSE), Kappa coefficient, Mean Absolute Error (MAE), R-squared value, sensitivity, specificity, Positive Predictive Value (PPV), and Negative Predictive Value (NPV). These metrics ensured a robust evaluation of the model's predictive accuracy and reliability, in line with best practices in geohazard modeling.

Results and Discussion

The Artificial Neural Network (ANN) model demonstrated strong predictive performance, achieving an accuracy of 0.8543, RMSE of 0.123, Kappa coefficient of 0.79, MAE of 0.098, and R-squared value of 0.9916. These metrics confirm the model's reliability in mapping landslide susceptibility across the Shahid Abbaspour Dam watershed. Analysis revealed three primary factors driving landslide risk in the area. Proximity to rivers emerged as the most influential, likely due to mechanisms such as bank erosion, increased soil moisture, and fluctuating groundwater levels. This finding aligns with Zakerinejad and

Amoshahi (2022), who noted heightened risk within 100 meters of watercourses in similar regions. Slope gradient ranked as the second key factor, with steep slopes, particularly in the southwestern Dezful region, amplifying instability. Geological formations, especially the erosion-prone Gachsaran Formation and Quaternary alluvial deposits rich in marl, ranked third, underscoring their role in susceptibility. This observation echoes Mohammadi et al. (2022), who studied the Izeh and Deh Sheikh (Abbaspour Dam) basins. In contrast, elevation and slope curvature showed limited influence, differing from Selamat et al. (2022), where elevation was a primary factor, possibly due to the unique topographic and geologic traits of our study area. Other factors, such as NDVI and seismic activity, had moderate to minor roles, likely reflecting stable vegetation cover and low seismicity. The susceptibility map classified 31.3% of the area (75.37 km²) as high-risk zones, concentrated in the southwest and a small northern section. Sensitivity analysis across susceptibility classes showed consistent performance, with values ranging from 0.8060 for the lowest class to 0.8717 for the high-susceptibility class. These results highlight the ANN's effectiveness and its alignment with regional patterns, offering a reliable tool for understanding landslide dynamics in the watershed.

Conclusion

This study successfully developed a landslide susceptibility map for the Shahid Abbaspour Dam watershed using an Artificial Neural Network, identifying key factors and high-risk zones. Proximity to rivers, slope gradient, and geological formations, particularly the Gachsaran Formation and Quaternary alluvium, emerged as the primary drivers of landslide risk. High-susceptibility zones, covering 31.3% of the area, were predominantly located in the southwestern and northern parts, providing critical insights for targeted interventions. The ANN model performed robustly, with an accuracy of 0.8543, RMSE of 0.123, Kappa of 0.79, MAE of 0.098, and R-squared of 0.9916, validating its predictive power. These metrics underscore the model's reliability and its potential for application in similar watersheds prone to landslides. By quantifying the influence of environmental and terrain factors, this research offers a scientific foundation for land-use planning, infrastructure design, and disaster risk management in northeastern Khuzestan. The findings can guide policymakers and planners in prioritizing mitigation efforts, such as stabilizing slopes near rivers, regulating development on steep terrain, and monitoring vulnerable geological units. Future studies could refine this model by incorporating real-time data, such as rainfall forecasts or seismic monitoring, to enhance predictive accuracy and adaptability.



مدل سازی حساسیت زمین لغزش با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: حوضه آبریز سد شهید عباسپور، شمال شرق خوزستان)

مehشید معاوی^۱، هیوا علمی زاده^{۲*}، مژگان انتظاری^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
^{۲*} دانشیار، گروه زمین شناسی دریایی، دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه خرمشهر، خرمشهر، ایران
^۳ دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
زمین لغزشها به عنوان یکی از مهم ترین مخاطرات طبیعی می توانند خسارات شدیدی به بار آورند. در این زمینه، تهیه نقشه های حساسیت زمین لغزش برای برنامه ریزی، مدیریت و پیشگیری از وقوع این پدیده و در نتیجه کاهش خسارات ناشی از آن، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. هدف اصلی این پژوهش، تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش برای حوضه سد شهید عباسپور با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی (NNET) است. در این مطالعه، داده های مربوط به نقاط زمین لغزش به صورت تصادفی و با نسبت ۷۰ به ۳۰ بین داده های آموزشی و داده های آزمون تقسیم شدند. در ادامه پانزده عامل مؤثر بر زمین لغزش شامل عوامل توپوگرافیک (ارتفاع، شیب، جهت شیب و انحنای دامنه)، شاخص های هیدرولوژیک (SPI) و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، عوامل انسانی (فاصله از جاده) و ویژگی های طبیعی (فاصله از رودخانه، زمین شناسی، بافت خاک، کاربری اراضی و بارش) مورد بررسی قرار گرفتند. برای اعتبارسنجی مدل پیش بینی زمین لغزش، از معیارهای مختلفی شامل Accuracy و شاخص های آماری RMSE، Kappa، MAE و R-Squared استفاده شده است. نتایج حاصل از این ارزیابی ها نشان داد که مدل NNET از عملکرد خوبی با دقت ۰/۸۵۴۳ برخوردار است. یافته های پژوهش حاکی از آن است که در حوضه سد شهید عباسپور، نزدیکی به رودخانه به عنوان مهم ترین عامل مؤثر در حساسیت زمین لغزش شناسایی شده است. پس از این عامل، شیب دامنه و ویژگی های زمین شناسی در رتبه های بعدی اهمیت قرار دارند. همچنین نتایج نشان می دهد که مناطقی که بیشترین حساسیت به زمین لغزش را دارا هستند عمدتاً در بخش های جنوب غربی و قسمت هایی از شمال حوضه واقع شده اند. نقشه حساسیت زمین لغزش تهیه شده در این تحقیق، می تواند به عنوان ابزاری ارزشمند در برنامه ریزی های توسعه ای، مدیریت ریسک و پیشگیری از	<p>تاریخچه مقاله:</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۶</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۱</p> <p>کلمات کلیدی:</p> <p>نقشه حساسیت زمین لغزش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) سنجش از دور حوضه آبریز سد شهید عباسپور جنوب غرب ایران</p>

خسارات ناشی از زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه، مورد استفاده قرار گیرد. این یافته‌ها، به مدیران و برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا تصمیم‌گیری‌های مناسب‌تری در زمینه توسعه منطقه اتخاذ نمایند.

مقدمه

زمین لغزش به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی، سالانه خسارات جانی و مالی قابل توجهی در سراسر جهان ایجاد می‌کند (Sun et al., 2020; Bao et al., 2020). این پدیده زمین‌شناسی که به حرکت رو به پایین توده‌های خاک و سنگ در امتداد دامنه‌های شیب‌دار اطلاق می‌شود (Hung, Leroueil & Picarelli, 2024)، می‌تواند به اشکال مختلفی از جمله سقوط، واژگونی، لغزش دورانی، لغزش انتقالی، گسترش جانبی و جریان رخ دهد. سرعت این حرکات نیز از کند تا بسیار سریع، متغیر است. عوامل متعددی در وقوع زمین لغزش نقش دارند که مهم‌ترین آنها شامل ویژگی‌های خاک و سنگ بستر، شرایط توپوگرافی، عوامل هیدرولوژیکی و فعالیت‌های انسانی می‌شود (Mohammadi, Shahabi & Bin Ahmad, 2018). این تنوع عوامل و پیچیدگی روابط بین آنها، توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق را با چالش‌های جدی، مواجه کرده است. در این میان، کیفیت داده‌های ورودی و روش‌شناسی مدل سازی از تعیین‌کننده‌ترین عوامل در دستیابی به نتایج قابل اعتماد هستند (Hung et al., 2024).

ارزیابی خطر زمین لغزش به دو دسته کیفی و کمی تقسیم می‌شود. روش‌های کیفی مانند: تحلیل توزیعی، تحلیل ژئومورفیک و ارزیابی خبره، عمدتاً بر اساس تجربه و تخصص کارشناسان انجام می‌گیرد. در مقابل، روش‌های کمی با استفاده از تحلیل‌های عددی و آماری، امکان پیش‌بینی دقیق‌تری را فراهم می‌کنند (Hung et al., 2024; Selamat, Majid, Taha & Osman, 2022). نقشه‌برداری حساسیت زمین لغزش (LSM) به‌عنوان یکی از مؤثرترین ابزارهای مدیریت ریسک، با تحلیل تاریخی عوامل ژئومحیطی مؤثر در وقوع زمین لغزش‌های گذشته، امکان پیش‌بینی مناطق مستعد را فراهم می‌کند. در سال‌های اخیر، مدل‌های یادگیری ماشین مانند شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، نایو بیز (NB)، درخت تصمیم (DT) و جنگل تصادفی (RF) به دلیل توانایی در کشف روابط غیرخطی بین عوامل مؤثر، نتایج امیدبخشی در این زمینه ارائه داده‌اند (Selamat et al., 2022).

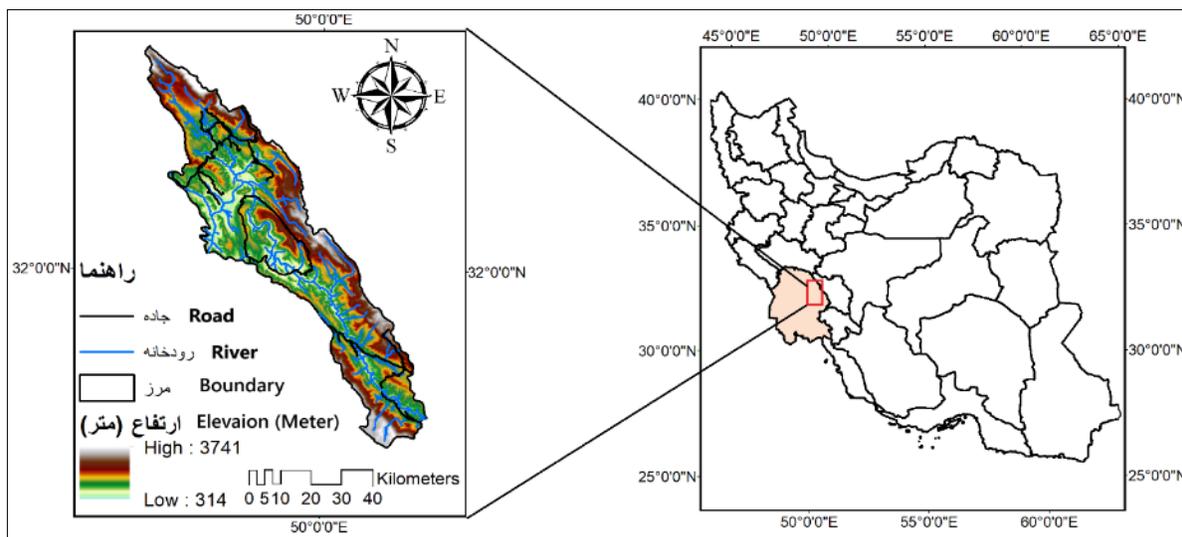
منطقه مورد مطالعه این تحقیق، در حوضه آبریز سد شهید عباسپور واقع در شمال شرق استان خوزستان قرار دارد. ویژگی‌های منحصر به فرد این منطقه از جمله قرارگیری در کمربند چین خورده زاگرس، وجود گسل‌های فعال، شبکه زهکشی فصلی و دریاچه سد کارون ۳، آن را به منطقه‌ای بسیار مستعد برای وقوع زمین لغزش تبدیل کرده است (Ghaedi, Amouzegar & Shojaiean, 2022; Mohammadi, Afifi & Ghanbari, 2023). با توجه به تأثیرات مخرب زمین لغزش‌ها بر پایداری دامنه‌ها، اراضی کشاورزی و توسعه مناطق شهری و روستایی، انجام مطالعات دقیق در این زمینه از ضرورت بالایی برخوردار است. این تحقیق به‌عنوان نخستین مطالعه جامع در زمینه مدل‌سازی حساسیت زمین لغزش با استفاده از الگوریتم NNET در حوضه آبریز سد شهید عباسپور، می‌تواند مبنای علمی ارزشمندی برای برنامه‌ریزی‌های آینده و کاهش مخاطرات طبیعی در این منطقه فراهم کند.

پژوهشگران ایرانی متعددی از روش‌های یادگیری ماشین برای مدل‌سازی حساسیت زمین لغزش استفاده کرده‌اند. حجازی و همکاران (Hejazi, Rezaeimoghadam & Naseri, 2020) در مطالعه‌ای پیشگامانه در پایین دست سد سنندج، از ترکیب مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و روش تاپسیس برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش استفاده کردند. در این پژوهش که با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و زبان برنامه‌نویسی پایتون انجام شد، از ۹ لایه اطلاعاتی شامل عوامل مؤثر در زمین لغزش استفاده گردید. ساختار شبکه عصبی به کار رفته شامل: ۹ نورون در لایه ورودی، ۳۰ نورون در لایه پنهان و ۱ نورون در لایه خروجی بود که با الگوریتم یادگیری Adam آموزش دید. نتایج نشان داد مدل ANN با خطای کمتر و انطباق بهتر با شرایط منطقه، عملکرد مطلوب‌تری نسبت به روش تاپسیس دارد. در مطالعه دیگری، اسفندیاری درآبادی و همکاران (Esfandiary Darabad, Rahimi, Navidfar & Arsalan, 2020) به ارزیابی حساسیت زمین لغزش در محور ارتباطی حیران- اردبیل پرداختند. این پژوهش با استفاده از مدل‌های ANN و SVM انجام شد و عوامل مؤثر شامل زمین‌شناسی، ارتفاع، جهت شیب و کاربری اراضی را شناسایی کرد. یافته‌ها نشان داد که مدل SVM در این

منطقه خاص، عملکرد بهتری داشته است. همچنین مشخص شد که اراضی مرتعی، کشاورزی و جاده‌های بالای ۱۴۰۰ متر در غرب گردنه حیران بیشترین حساسیت را به زمین‌لغزش دارند. رجیبی و همکاران (Rajabi, Rezaeimoghadam & Takzare, 2020) در حوضه آبریز الموت رود استان قزوین از مدل ANN برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش استفاده کردند. نتایج نشان داد که به ترتیب ۲۶.۸۴٪، ۳۱.۳۶٪، ۲۱.۳۲٪، ۱۶.۹۱٪ و ۳.۴۹٪ از منطقه در کلاس‌های خطر خیلی کم تا خیلی زیاد قرار دارند. مطالعه پلائی و شادفر (Talaei & Shadfar, 2023) در حوضه سقزچای استان اردبیل نشان داد که مدل ANN در مقایسه با رگرسیون لجستیک از دقت بالاتری برخوردار است. در این پژوهش، میانگین بارندگی سالانه و بیشینه شتاب افقی زمین به‌عنوان مهم‌ترین عوامل پیش‌بینی کننده لغزش شناسایی شدند. صادقی بلوچی و علیان (Sadeghi Balochi & Alian, 2025) نیز در شهرستان لاهیجان از مدل ANN برای ارزیابی خطر زمین‌لغزش استفاده کردند. نتایج پهنه‌بندی نشان داد که مدل ANN در این منطقه عملکرد مناسبی داشته است. در سطح جهانی، پژوهشگران متعددی از روش‌های پیشرفته یادگیری ماشین برای مدلسازی حساسیت زمین‌لغزش استفاده کرده‌اند. سلامت و همکاران (Selamat et al., 2022) در مطالعه‌ای بر روی حوضه رودخانه لانگات در مالزی، از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) برای تولید نقشه حساسیت زمین‌لغزش استفاده کردند. این پژوهش به نتایج قابل توجهی با مقدار AUC معادل ۰.۹۴۰ برای هر دو مجموعه داده آموزش و آزمون دست یافت. تحلیل عوامل مؤثر نشان داد که بارندگی (با وزن ۰/۲۴۸)، فاصله تا جاده (۰/۲) و ارتفاع (۰/۱۳۶) به ترتیب مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در این منطقه هستند. مسروح و همکاران (Masruroh, Leksono & Kurniawan, 2023) در منطقه برومو تنگر سمر و اندونزی، رویکردی ترکیبی شامل تصاویر ماهواره‌ای سنتینل، عکس‌های هوایی برداشت شده با پهپاد و الگوریتم ANN را به کار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان داد که ۲۹٪ از منطقه در کلاس حساسیت پایین، ۳٪ در حساسیت متوسط، ۲٪ در حساسیت بالا و ۱۵٪ در حساسیت بسیار بالا قرار دارد. تحلیل عوامل مؤثر نشان داد که توپوگرافی مهم‌ترین عامل بوده و پس از آن عوامل هیدرولوژیکی و ویژگی‌های سطحی قرار دارند. سان و همکاران (Sun et al., 2022) در مطالعه‌ای جامع به مقایسه عملکرد الگوریتم‌های ANN و جنگل تصادفی (RF) پرداختند. این پژوهش با ایجاد پایگاه داده‌ای شامل ۲۲ عامل مؤثر و ۸۶۶ زمین‌لغزش تاریخی و استفاده از الگوریتم SHAP برای تفسیر نتایج، نشان داد که مدل RF از پایداری و استحکام بیشتری برخوردار است. یافته‌های این مطالعه حاکی از آن است که عوامل مشابه ممکن است در مدل‌های مختلف نقش‌های متفاوتی ایفا کنند. ما و همکاران (Ma, Chen, Wu & Li, 2023) در حوضه دریاچه یینگهو شآنش، از سه الگوریتم K-means، RF و ANN برای پیش‌بینی حساسیت زمین‌لغزش استفاده کردند. این مطالعه که بر اساس ۱۲ عامل شرطی انجام شد، نشان داد که مدل‌های RF و ANN عملکرد بهتری دارند، با این حال RF از قابلیت پیش‌بینی بالاتری برخوردار بود. همچنین نتایج نشان داد که تعداد زمین‌لغزش‌های ثبت شده بر قابلیت اطمینان نتایج تأثیر مستقیم دارد. بنمخلوف و همکاران (Benmakhlof, El Kharim, Galindo, 2023) در زنجیره ریف بیرونی غربی، سه الگوریتم RF، XGBoost و KNN را مورد مقایسه قرار دادند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که RF با مقدار AUC معادل ۰/۸۶ بهترین عملکرد را داشته است. در این مطالعه، شیب، بارندگی و ارتفاع به‌عنوان مهم‌ترین عوامل شناسایی شدند، در حالی که شاخص‌های TWI و SPI کمترین تأثیر را داشتند. با توجه به تجربیات موفق پژوهشگران بین‌المللی و نتایج ارزشمند حاصل از کاربرد روش‌های یادگیری ماشین در مدلسازی زمین‌لغزش، این پژوهش با به‌کارگیری رویکرد شبکه عصبی مصنوعی به بررسی حساسیت زمین‌لغزش در حوضه آبریز سد شهید عباسپور می‌پردازد. انتخاب این روش بر اساس مزایای متعدد آن از جمله توانایی در مدلسازی روابط غیرخطی و پیچیده بین عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش صورت گرفته است.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سد شهید عباسپور بخش مهمی از حوضه آبریز کارون بزرگ با مختصات جغرافیایی ۲۳°-۴۹' تا ۲۱°-۵۰' طول شرقی و ۲۶°-۳۱' تا ۳۹°-۳۲' عرض شمالی در شمال شرق استان خوزستان را تشکیل می‌دهد (Ali Bakhshi, Azizi, Vafaiejad & Aghamohammadi Zanjirabadi, 2020). محدوده مورد مطالعه از بلندی‌های کوه کینو در شمال سد، شروع شده و تا محل تلاقی رودخانه خرسان با شاخه اصلی کارون در جنوب شرقی امتداد می‌یابد. سیستم آبی منطقه شامل دریاچه سد شهید عباسپور به‌عنوان هسته مرکزی و مسیل‌های مهمی مانند آب سرحوض، آب شلا و آب الگی است که جریان‌های آب مناطق شمال غرب و جنوب شرق را به دریاچه یا شاخه اصلی کارون هدایت می‌کنند (Geological and Mineral Exploration Organization of Iran, 2018). منطقه مورد مطالعه دارای توپوگرافی کوهستانی با شیب‌های تند و دره‌های عمیق است. این شرایط خاص توپوگرافیک همراه با سیستم زهکشی متراکم و ساختار زمین‌شناسی ویژه، منطقه را به محیطی مستعد برای وقوع زمین لغزش تبدیل کرده است. قرارگیری در زون زاگرس چین خورده و وجود سازندهای حساس به فرسایش، از دیگر ویژگی‌های مهم زمین‌شناسی این محدوده محسوب می‌شوند (Majd-bavi & Mumipour, 2022) (شکل ۱).



شکل ۱- نقشه منطقه مورد مطالعه

Fig. 1. Study Area map

مواد و روش‌ها

این پژوهش در پنج مرحله اصلی انجام شد: (۱) بررسی پیشینه تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها، (۲) تهیه لایه‌های اطلاعاتی، (۳) اجرای مدل شبکه عصبی، (۴) تهیه نقش پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش، (۵) اعتبارسنجی مدل. در این مطالعه، ۱۵ عامل مؤثر در زمین لغزش شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، سازندهای زمین‌شناسی، کاربری اراضی، NDVI، بافت خاک، زلزله، انحنای دامنه، TWI، SPI، رابطه (۱) و بارش مورد بررسی قرار گرفتند. تمامی لایه‌های اطلاعاتی در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.8 تهیه شدند. در این راستا از داده‌های پایه، شامل نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ محدوده مورد مطالعه و مدل رقومی ارتفاع (DEM) سنجنده ASTER با قدرت تفکیک ۳۰ متر استفاده شد. پارامترهای شیب، جهت شیب، SPI و انحنای دامنه با استفاده از DEM منطقه، استخراج گردیدند. شاخص TWI با استفاده از رابطه (۲) در محیط نرم‌افزار SAGA-GIS 9.0.1 محاسبه شد.

نقشه‌سازندهای زمین‌شناسی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ استان خوزستان تهیه و در محیط ArcMap 10.8 رقومی و به فرمت رستری تبدیل شد. نقشه فاصله از رودخانه با استفاده از ابزارهای هیدرولوژی و فاصله اقلیدسی در ArcGIS تولید گردید. داده‌های کاربری اراضی و بافت خاک به ترتیب از سازمان جهاد کشاورزی و سازمان منابع طبیعی استان خوزستان اخذ شدند. همچنین داده‌های بارش ۲۰ ساله (۱۳۸۲-۱۴۰۲) از ایستگاه‌های باران‌سنجی منطقه با روش درون‌یابی کریجینگ تحلیل شدند. شاخص NDVI نیز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ و رابطه (۳) در نرم‌افزار ENVI 5.6 محاسبه گردید.

$$SPI = A_s \tan \beta \quad (1)$$

که در آن؛ A_s : سطح ویژه حوضه و β : درجه شیب است. برای تهیه این شاخص از مدل رقومی ارتفاع (DEM) در نرم‌افزار ArcMap 10.8 استفاده گردید.

$$TWI = \ln (A_s / (\tan(\beta))) \quad (2)$$

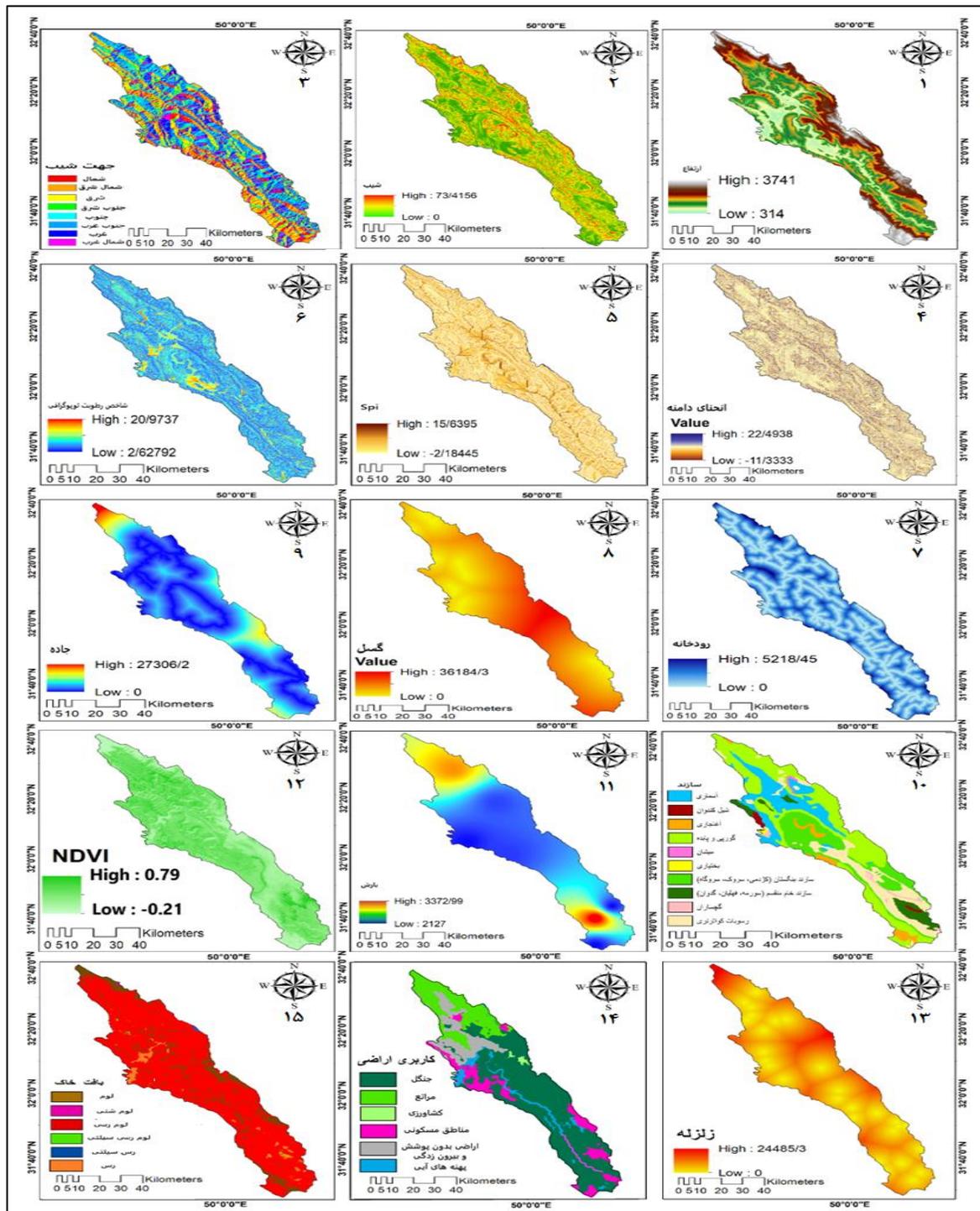
که در آن؛ A_s : سطح ویژه حوضه بر حسب مساحت تجمعی بالادست (مساحت بالادست در واحد طول خط تراز)، β : درجه شیب است که گرایش آب را به جمع شدن در هر نقطه از حوضه (بر حسب A_s) و تمایل نیروهای گرانشی را به انتقال آب پایین دست (بر حسب $\tan \beta$ به‌عنوان شیب هیدرولیکی تقریبی) توصیف می‌کند (Sadati, Mousavi, Vahabzadeh Kebria & Roshun, 2025).

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (3)$$

که در آن؛ NIR، بازتاب در باند مادون قرمز نزدیک و RED بازتاب در باند قرمز است. این شاخص در محدوده -۱ تا +۱ بوده، ولی در عمل کمتر از ۱ و بیشتر از -۱ می‌باشد. مقادیر این شاخص برای پوشش گیاهی متراکم به سوی عدد یک، ابرها، برف و آب با مقادیر منفی و سنگ‌ها و خاک‌های بایر با مقادیر نزدیک به صفر دیده می‌شوند (Tayebi far, 2024). مطالعه حاضر، با استفاده از ترکیبی از منابع مختلف شامل نقشه‌های زمین‌لغزش اداره کل منابع طبیعی استان خوزستان، بازدیدهای میدانی گسترده و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای Google Earth موفق به شناسایی ۱۲۹ نقطه زمین‌لغزش در حوضه آبریز مورد مطالعه قرار گرفت. این داده‌ها در قالب نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۳). در مرحله آماده‌سازی داده‌ها برای مدل‌سازی و تحلیل‌های آماری، ۲۵۰۰ نقطه به صورت تصادفی در محیط نرم‌افزار Rstudio استخراج شد. این نقاط به دو گروه آموزشی (شامل ۱۹۷۴ پیکسل: ۷۰٪ داده‌ها) و گروه اعتبارسنجی (شامل ۶۵۵ پیکسل: ۳۰٪ داده‌ها) تقسیم شدند (Mostofi, 2013; Tayebi far, 2024; Mousavi Nadushan, 2012). در مرحله پیاده‌سازی الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی، از مدل NNET با معماری تک لایه پنهان، استفاده شد که ویژگی‌های کلیدی مانند توانایی مدل‌سازی روابط غیرخطی پیچیده، استفاده از ۱۵ عامل تأثیرگذار در زمین‌لغزش، بهینه‌سازی وزن‌های اتصالات بین نورون‌ها و قابلیت پیش‌بینی احتمال وقوع زمین‌لغزش را دارا می‌باشد (Rahaman, Dondapati, Gupta & Raj, 2024). جهت ارزیابی و اعتبارسنجی مدل از مجموعه‌ای جامع از معیارهای ارزیابی شامل شاخص‌های طبقه‌بندی (Sensitivity, Specificity, PPV, NPV)، معیارهای کمی (Accuracy, RMSE, MAE, R-Squared) و شاخص Kappa (برای ارزیابی توافق پیش‌بینی‌ها) استفاده شد (جدول ۱). این روش‌شناسی جامع، امکان شناسایی دقیق مناطق پرخطر و مدیریت کارآمد ریسک زمین‌لغزش را در منطقه مورد مطالعه، فراهم کرده است. در نهایت نتایج حاصل از این تحلیل‌ها در جداول و نمودارهای مربوطه ارائه شده‌اند.

۱. داده‌های نقاط زمین لغزشی اصلی و تصادفی.

۲. داده‌های تاریخی و برداشت شده از Google Earth، به‌عنوان نقاط نمونه مثبت زمین لغزش استفاده شده، در حالی که نقاط غیر لغزشی، به‌عنوان نقاط نمونه منفی تعیین شده و پایگاه داده مدل را تشکیل می‌دهند.



شکل ۲- به ترتیب نقشه‌های پارامتر ۱: ارتفاع ۲: شیب ۳: جهت شیب ۴: انحنا دامنه ۵: SPI ۶: TWI ۷: رودخانه ۸: گسل ۹: جاده ۱۰:

زلزله ۱۱: بارش ۱۲: NDVI ۱۳: سازندهای زمین‌شناسی ۱۴: کاربری اراضی ۱۵: بافت خاک

Fig. 2. Maps of parameters, in order: 1. Elevation, 2. Slope, 3. Aspect, 4. Slope curvature, 5. SPI, 6. TWI, 7. Streams, 8. Faults, 9. Roads, 10. Seismic activity, 11. Precipitation, 12. NDVI, 13. Geological formations, 14. Land use, 15. Soil texture

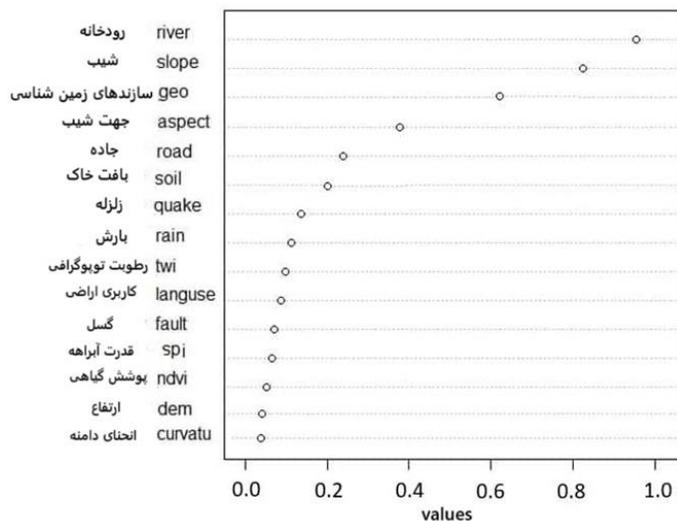
جدول ۱- معیارهای ارزیابی کلاس‌های حساسیت زمین لغزش و اعتبارسنجی الگوریتم شبکه عصبی

Table 1- Evaluation criteria of landslide susceptibility classes and validation of the ANN (Wahba et al., 2024)

نماد Symbol	نماد Symbol	فرمول محاسبه Calculation Formula	رابطه
Sensitivity	حساسیت	$\frac{TP}{TP + FN}$	رابطه (۴)
Specificity	ویژگی	$\frac{TN}{TN + FP}$	رابطه (۵)
Positive Predictive Value (PPV)	ارزش پیش بینی مثبت	$\frac{TP}{FP + TP}$	رابطه (۶)
Negative Predictive Value (NPV)	ارزش پیش بینی منفی	$\frac{TN}{FN + TN}$	رابطه (۷)
Prevalence	فراوانی	$\frac{TP}{TP + FN}$	رابطه (۸)
Accuracy	دقت کلی	$\frac{TP + TN}{TP + FN + FP + TN}$	رابطه (۹)
Kappa	ضریب کاپا	$\frac{PO - Pc}{1 - Pc} * 100$	رابطه (۱۰)
RMSE	ریشه میانگین مربعات خطا	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [x_i - x]^2$	رابطه (۱۱)
MAE	میانگین خطای مطلق	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_i - x]$	رابطه (۱۲)
R-Squared	ضریب تعیین	$1 - \frac{SSE}{SST} = \frac{\sum(Y - Y_1)^2}{\sum(Y - Y)^2}$	رابطه (۱۳)

نتایج و بحث

بر اساس نتایج پژوهش در منطقه مورد مطالعه، رودخانه، شیب و سازندهای زمین‌شناسی به ترتیب تأثیرگذارترین عوامل در حساسیت زمین لغزش شناسایی شدند. فاصله از رودخانه به‌عنوان مهم‌ترین عامل تعیین‌گرید که با فرسایش پای دامنه‌ها، افزایش رطوبت خاک و تغییرات سطح آب زیرزمینی، پایداری شیب‌ها را کاهش می‌دهد. این یافته با نتایج ذاکری‌نژاد و عموشاهی (Zakerinejad & Amoshahi, 2022) که فاصله از آبراهه را مهم‌ترین عامل دانسته‌اند، همخوانی دارد. همچنین پارامتر شیب به‌عنوان دومین عامل مؤثر شناسایی شد. بخش جنوب‌غربی حوضه (دهدز) به دلیل ویژگی‌های کوهستانی و شیب‌های تند، حساسیت بالایی نشان داد. این نتیجه با یافته‌های قائدی و همکاران (Ghaedi et al., 2022)، هه و همکاران (He et al., 2019) و پلوک و همکاران (Pollock, Grant, Wartman & Abou-Jaoude, 2019) مطابقت دارد. سومین عامل حساسیت زمین لغزش، سازندهای زمین‌شناسی محاسبه گردید. آبرفت‌های نرم و فرسایش‌پذیر کواترنری و سازند گچساران به دلیل وجود مارن، منطقه را مستعد لغزش کرده‌اند. در مقابل، شاخص‌های ارتفاع و انحنای دامنه کمترین تأثیر را داشتند. این نتیجه با پژوهش محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2023) درباره حوضه‌های ایذه و ده شیخ همخوانی دارد.



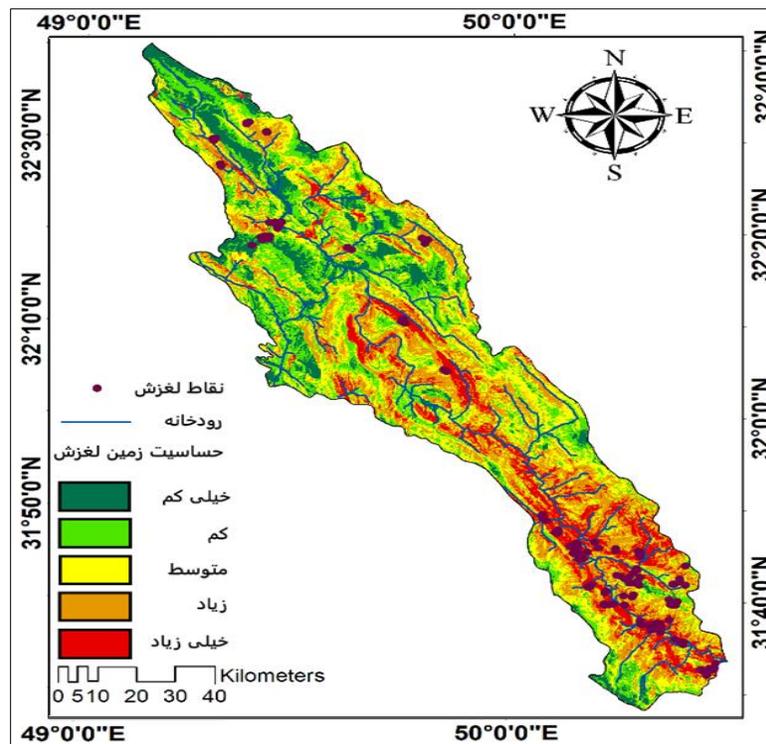
شکل ۳- اهمیت شاخص‌ها در حساسیت زمین لغزش محدوده مورد مطالعه
Fig. 3. Importance of indicators for landslide susceptibility in the study area

بررسی‌های میدانی در منطقه مورد مطالعه، نشان‌دهنده وقوع زمین لغزش در روستاهای زیرکوه شالو، ابوک، دوروه، میراحمد و آب گنجشکی بوده است. مشاهدات حاکی از تأثیر فعالیت‌های انسانی مختلف از جمله سدسازی، تغییر سیستم زهکشی، جاده‌سازی، ساخت‌وساز در دامنه‌ها و تونل‌سازی در افزایش حساسیت منطقه به زمین لغزش می‌باشد (شکل ۴). این عوامل با ایجاد تغییر در شرایط طبیعی شیب‌ها و الگوهای زهکشی، پایداری دامنه‌ها را تحت تأثیر قرار داده‌اند.



شکل ۴- عوامل تأثیرگذار در حساسیت زمین لغزش
Fig. 4. Influencing factors for landslide susceptibility

حساسیت زمین لغزش نشان‌دهنده پتانسیل وقوع این پدیده در مناطق مختلف است که عمدتاً از طریق تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی نمایش داده می‌شود. در این مطالعه، نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از روش شکست طبیعی به پنج کلاس تقسیم‌بندی شده است. این طبقه‌بندی به صورت گرافیکی در شکل ۵ ارائه شده است. نقشه مذکور امکان شناسایی مناطق پرخطر و برنامه‌ریزی برای مدیریت ریسک را فراهم می‌کند. هر کلاس نشان‌دهنده سطح متفاوتی از پتانسیل وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه، می‌باشد.



شکل ۵- پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش حوضه مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی
Fig. 5. Landslide susceptibility zoning in the study area using an artificial neural network

نتایج ارزیابی مدل شبکه عصبی مصنوعی در پنج کلاس حساسیت زمین لغزش در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس این نتایج، مدل در معیار Sensitivity بهترین عملکرد را در کلاس ۴ (۰/۸۷۱۷) و کمترین عملکرد را در کلاس ۱ (۰/۸۰۶) نشان داد. در معیار Specificity، بالاترین مقدار در کلاس ۱ (۰/۹۹۲۱) و کمترین مقدار در کلاس ۵ (۰/۹۰۱۸) مشاهده شد. مدل در این شاخص عملکرد بسیار بالایی در محاسبه داشته است.

ارزیابی معیار PPV نشان داد مدل در کلاس ۳ (۰/۸۷۹۴) بهترین و در کلاس ۵ (۰/۵۲۷۱) ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است. برای معیار NPV، بیشترین مقدار در کلاس ۱ (۰/۹۹۳۶) و کمترین مقدار در کلاس ۳ (۰/۸۸۹۵) ثبت شد. معیار Prevalence در کلاس ۲ (۹۹۰۱/۰) بالاترین و در کلاس ۳ (۸۴۰۰/۰) پایین‌ترین مقدار را نشان داد.

در معیار Detection Rate، مدل در کلاس ۴ (۰/۸۷۹) بهترین و در کلاس ۱ (۰/۶۰۰) ضعیف‌ترین عملکرد را داشت. برای معیار Detection Prevalence، بیشترین مقدار در کلاس ۱ (۰/۹۹۱۶) و کمترین مقدار در کلاس ۴ (۰/۷۰۵۴) مشاهده شد. دقت کلی مدل (Accuracy) در کلاس ۴ (۰/۹۱۰۱) به حداکثر و در کلاس ۱ (۰/۷۹۶۰) به حداقل رسید. به‌طور کلی الگوریتم شبکه عصبی با عملکرد و دقت بالا کلاس‌های حساسیت زمین لغزش را محاسبه نموده است (جدول ۲).

جدول ۲- مشخصات کلاس بندی زمین لغزش با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی

Table 2- Landslide classification specifications using the artificial neural network algorithm

Class 5	Class 4	Class 3	Class 2	Class 1	
0.8285	0.8717	0.8611	0.8400	0.8060	حساسیت Sensitivity
0.9018	0.9918	0.9279	0.9048	0.9921	ویژگی Specificity
0.5271	0.8316	0.8794	0.8607	0.5454	ارزش پیش بینی مثبت Positive Predictive Value (PPV)
0.9901	0.9465	0.8898	0.9618	0.9936	ارزش پیش بینی منفی Negative Predictive Value (NPV)
0.8992	0.9048	0.8400	0.9901	0.9302	شیوع Prevalence
0.8285	0.8790	0.7845	0.7527	0.6000	نرخ تشخیص Detection Rate
0.8011	0.7054	0.8992	0.9921	0.9916	شیوع تشخیص Detection Prevalence
0.9037	0.9101	0.8995	0.8829	0.7960	دقت Accuracy

همان طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، مناطق مستعد زمین لغزش بسیار کم با مساحت ۴۱/۲۶ کیلومتر با ۱۰/۱۲ درصد از کل، مناطق زمین لغزش با خطر کم با مساحت ۴۴/۳۲ کیلومتر با ۱۲/۵۸ درصد، مناطق مستعد لغزش با خطر متوسط با مساحت ۷۳/۲۵ کیلومتر با ۲۷/۷۱ درصد، مناطق مستعد زمین لغزش با خطر زیاد با مساحت ۷۵/۳۷ کیلومتر با ۳۰/۳۱ درصد و مناطق مستعد لغزش خطر خیلی زیاد با مساحت ۶۱/۱۰ کیلومتر با ۱۹/۱۰ درصد به خود اختصاص داده اند. در نتایج نقشه برداری پیش بینی خطر زمین لغزش، حوضه مورد مطالعه، در سطح زیاد و متوسط قرار گرفته است.

جدول ۳- توزیع مساحت و درصد درجات خطر زمین لغزش

Table 3- Area distribution and percentage of landslide hazard levels

درصد Percentage	مساحت (کیلومتر) Area (km ²)	کلاس خطر Hazard Class
10.12	41.26	خیلی کم Very Low
12.58	44.32	کم Low
27.71	73.25	متوسط Medium
30.31	75.37	زیاد High
19.10	61.10	خیلی زیاد Very High

در ادامه به محاسبه معیارهای اعتبارسنجی ۳۰ درصد (آزمایشی) به ۷۰ درصد (آموزشی) در نرم افزار Rstudio پرداخته گردید. همانطور که در جدول ۴ مشاهده می گردد، اعتبارسنجی الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی با معیار Accuracy برابر با (۰/۸۵۴۳) نشان می دهد مدل در مجموع عملکرد خوبی دارد. ضریب کاپا برابر با (۰/۷۶۴۷)، با در نظر گرفتن احتمال توافق تصادفی مقدار بالا (نزدیک به ۱) نشان می دهد که توافق بسیار خوبی، بین پیش بینی ها و مقادیر واقعی وجود دارد. RMSE با توجه به مقدار کم آن (۰/۰۰۶۸)، مدل پیش بینی های دقیقی انجام داده است. معیار Rsquared، (۰/۹۹۱۶) با توجه مقدار بالا (نزدیک به ۱) نشان می دهد که مدل به خوبی حساسیت زمین لغزش را توضیح داده است و در نهایت نتایج MAE (۰/۰۰۵۲) به دست آمده است. به طور کلی، نتایج نشان می دهند که مدل شبکه عصبی مصنوعی با دقت و عملکرد خوبی در جهت حساسیت زمین لغزش محاسبه شده است.

جدول ۴- نتایج اعتبار سنجی الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی

Table 4- Artificial neural network algorithm validation results

0.8543	Accuracy (دقت)
0.7647	Kappa (ضریب کاپا)
0.0068	RMSE (ریشه میانگین مربعات)
0.9916	Rsquared (ضریب تعیین)
0.0052	MAE (میانگین مطلق خطا)

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در حوضه آبریز سد شهید عباسپور انجام گردید و نتایج حاصل از آن حاوی نکات مهمی برای مدیریت ریسک و برنامه‌ریزی محیطی است. پژوهش حاضر نشان داد که پدیده زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم در مناطق مستعد بلایای طبیعی، نیازمند توجه، ویژه است. بر اساس بررسی‌های میدانی در روستاهای زیرکوه شالو، آب‌گنجشکی، ابوک و دوروه، عوامل مؤثر بر حساسیت زمین‌لغزش به‌ترتیب اهمیت شامل فاصله از رودخانه، شیب و سازندهای زمین‌شناسی بوده‌اند، در حالی که ارتفاع و انحنای دامنه کمترین تأثیر را داشته‌اند.

یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که حدود ۳۱/۳ درصد از منطقه مورد مطالعه (معادل ۷۵/۳۷ کیلومترمربع) در کلاس حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار دارد که این مساحت قابل توجه، لزوم توجه جدی به این پدیده را نشان می‌دهد. بررسی عوامل تأثیرگذار نشان داد که فاصله از رودخانه با تأثیر ۲۷/۸ درصد، مهم‌ترین عامل در وقوع زمین‌لغزش است. مکانیسم تأثیر رودخانه‌ها شامل سه فرآیند اصلی فرسایش پای‌دامنه‌ها و کاهش پایداری شیب، افزایش رطوبت خاک و کاهش مقاومت برشی و نوسانات سطح آب زیرزمینی می‌باشد. همچنین پارامتر شیب با سهم ۲۳/۵ درصدی به‌عنوان دومین عامل مهم شناسایی شد. مناطق با شیب بیش از ۳۵ درجه بیشترین حساسیت را نشان دادند. سازندهای زمین‌شناسی با تأثیر ۲۱/۹ درصدی در رتبه سوم قرار گرفتند، به‌طوری که سازندهای مارنی گچساران و آبرفت‌های کواترنری بیشترین آسیب‌پذیری را داشتند.

مدل شبکه عصبی توسعه‌یافته با دقت کلی ۸۵/۴۳ درصد و ضریب تعیین ۹۹/۱۶ درصد، عملکرد بسیار مطلوبی از خود نشان داد. تحلیل معیارهای مختلف نشان می‌دهد که مدل در شناسایی مناطق پرخطر موفق عمل کرده و نشان‌دهنده دقت بالا در پیش‌بینی مناطق پرخطر است.

همچنین، اعتبارسنجی الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی با معیار Accuracy برابر با (۰/۸۵۴۳) و معیار Rsquared (۰/۹۹۱۶) نشان می‌دهد مدل در مجموع عملکرد خوبی دارد. نتایج کلاس‌های حساسیت زمین‌لغزش در عملکرد معیار Sensitivity به ترتیب از کمترین به بیشترین، کلاس ۱ (۰/۸۰۶۰)، کلاس ۵ (۰/۸۲۸۵)، کلاس ۲ (۰/۸۴۰۰)، کلاس ۳ (۰/۸۶۱۱) و کلاس ۴ (۰/۸۷۱۷)، برآورد شده‌اند. به‌طور کلی، الگوریتم شبکه عصبی با عملکرد و دقت بالا، کلاس‌های حساسیت زمین‌لغزش را محاسبه نموده است. طبقه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش، به‌ویژه برای مناطق با حساسیت بالا و متوسط، از دقت و قابلیت اطمینان مناسبی برخوردار است. این موضوع اهمیت زیادی برای مدیریت ریسک، هشدار زودهنگام و برنامه‌ریزی کاربری اراضی در مناطق مستعد زمین‌لغزش دارد. مناطق با حساسیت خیلی پایین ممکن است نیاز به بررسی‌های تکمیلی داشته باشند تا از عدم وجود خطای منفی اطمینان حاصل شود. بنابراین پیشنهاد می‌گردد:

- پایداری شیب‌ها با روش‌های مهندسی مانند میخکوبی، شمع کوبی یا ژئوگرید.
- استفاده از نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش با دقت بالا (مانند مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی با دقت بیش از ۹۰ درصد) در برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای.

- ایجاد سیستم‌های هشدار زودهنگام برای مناطق پرخطر، به‌خصوص در زمان بارندگی‌های شدید.

- کنترل و هدایت مناسب آب‌های سطحی در مناطق مستعد لغزش.
 - جلوگیری از نشت آب لوله‌های انتقال و مخازن ذخیره آب در دامنه‌ها.
 - مدیریت آبیاری در زمین‌های کشاورزی واقع در شیب‌ها.
 - استقرار سیستم‌های پایش مداوم تغییرات سطح زمین در مناطق با حساسیت بالا.
 - بررسی‌های دوره‌ای مناطق پرخطر، به ویژه پس از بارندگی‌های شدید یا زلزله.
 - به‌روزرسانی نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش با داده‌های جدید.
- با توجه به گستردگی مناطق پرخطر در حوضه مورد مطالعه، اجرای برنامه‌های مدیریت ریسک یک ضرورت انکارناپذیر است. ترکیب راهکارهای سازه‌ای و غیرسازه‌ای با سیستم‌های پایش پیشرفته می‌تواند به کاهش قابل توجه خسارات ناشی از این پدیده منجر شود. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنای علمی بسیار مناسبی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در منطقه باشد.

سپاسگزاری

تیم پژوهشی مراتب قدردانی صمیمانه خود را از دانشگاه اصفهان به دلیل ارائه حمایت مالی ضروری و امکانات پژوهشی که این پژوهش را ممکن ساخت، ابراز می‌دارد. همچنین، از مشارکت سازمان‌های مختلف در ارائه داده‌ها و کمک‌های فنی با سپاسگزاری یاد می‌شود.

References

- Ali Bakhshi, T., Azizi, Z., Vafaeinejad, A., & Aghamohammadi Zanjirabadi, H. (2020). Survey of area changes in water basins of Shahid Abbaspour Dam caused by 2019 floods using Google Earth Engine. *Ecohydrology*, 7(2), 345–357. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/ije.2020.295785.1272>
- Bao, Y., Zhai, S., Chen, J., Xu, P., Sun, X., Zhan, J., ... & Zhou, X. (2020). The evolution of the Samaoding paleo-landslide river blocking event at the upstream reaches of the Jinsha River, Tibetan Plateau. *Geomorphology*, 351, 106970. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.106970>
- Benmakhlof, M., El Kharim, Y., Galindo-Zaldívar, J., & Sahrane, R. (2023). Landslide susceptibility assessment in Western External Rif Chain using machine learning methods. *Civil Engineering Journal*, 9(12), 3045–3060. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-12-018>
- Esfandiary Darabad, F., Rahimi, M., Navidfar, A., & Arsalan, M. (2020). Assessment of landslide sensitivity by neural network method and vector machine algorithm (Case study: Heyran Road, Ardabil Province). *Quantitative Geomorphological Research*, 9(3), 18–33. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.122210>
- Geological and Mineral Exploration Organization of Iran. (2018). Identification of landslide susceptibility in the city of Masjed-e-Suleiman, General Directorate of the South Western Region (Ahvaz). [In Persian]
- Ghaedi, S., Amouzegar, S., & Shojaiean, A. (2022). Landslide microzonation using fuzzy grey correlation analysis (case study: Mollaghafar drainage basin, northeast of Khuzestan Province). *Advanced Applied Geology*, 12(2), 337–350. [In Persian] <https://doi.org/10.22055/AAG.2021.36387.2195>
- He, Q., Shahabi, H., Shirzadi, A., Li, S., Chen, W., Wang, N., ... & Ahmad, B. B. (2019). Landslide spatial modelling using novel bivariate statistical based Naïve Bayes, RBF Classifier, and RBF Network machine learning algorithms. *Science of the Total Environment*, 663, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.329>
- Hejazi, A., Rezaeimoghaddam, M., & Naseri, A. (2020). Landslide hazard zoning using artificial neural network models and TOPSIS downstream of Sanandaj Dam. *Hydrogeomorphology*, 7(24), 65–82. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/hyd.2020.11060>
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2024). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>

- Ma, S., Chen, J., Wu, S., & Li, Y. (2023). Landslide susceptibility prediction using machine learning methods: A case study of landslides in the Yinghu Lake Basin in Shaanxi. *Sustainability*, *15*, 15836. <https://doi.org/10.3390/su152215836>
- Majd-Bavi, A., & Mumipour, M. (2022). Landslide susceptibility zonation in Shahid Abbaspour Dam district. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *10*(1), 65-80. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.67029.0>
- Masruroh, H., Leksono, A. S., & Kurniawan, S. (2023). Developing landslide susceptibility map using Artificial Neural Network (ANN) method for mitigation of land degradation. *Journal of Degraded & Mining Lands Management*, *10*(3), 4479-4494. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2023.103.4479>
- Mohammadi, A., Shahabi, H., & Bin Ahmad, B. (2018). Integration of InSAR technique, Google Earth images and extensive field survey for landslide inventory in a part of Cameron Highlands, Pahang, Malaysia. *Applied Ecology & Environmental Research*, *16*(6), 8075-8091. https://dx.doi.org/10.15666/aeer/1606_80758091
- Mohammadi, M., Afifi, M. A., & Ghanbari, A. R. (2023). Landslide hazard zoning using a fuzzy inference system in the Izeh River basin. *Geographical Sciences*, *19*(42), 156-176. [In Persian] <https://sanad.iau.ir/fa/Journal/geographic/Article/919283>
- Mostofi, N. (2013). *MATLAB User Guide*. Tehran Publications. [In Persian]
- Mousavi Nadushan, S. S. (2012). *Introduction to the R computing language*. Tehran, Iran: Shahid Abbaspour University of Water and Electricity Industry. [In Persian]
- Pollock, W., Grant, A., Wartman, J., & Abou-Jaoude, G. (2019). Multimodal method for landslide risk analysis. *MethodsX*, *6*, 827-836.
- Rahaman, A., Dondapati, A., Gupta, S., & Raj, R. (2024). Leveraging artificial neural networks for robust landslide susceptibility mapping: A geospatial modeling approach in the ecologically sensitive Nilgiri District, Tamil Nadu. *Geohazard Mechanics*, *2*(4), 258-269. <https://doi.org/10.1016/j.ghm.2024.07.001>
- Rajabi, M., Rezaeimoghadam, M., & Takzare, A. (2020). Landslide hazard potential zoning using the neural network method (Case study: Alamut watershed in Qazvin Province). *Quantitative Geomorphological Research*, *9*(3), 185-171. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.122223>
- Sadati, S. H., Mousavi, S. R., Vahabzadeh Kebria, G., & Roshun, S. H. (2025). Evaluation of random forest and support vector machine models in landslide risk mapping (Case study: Tajan Basin, Mazandaran Province). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 1-1. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/jneh.2025.50031.2071>
- Sadeghi Balochi, M., & Alian, S., (2025), Landslide Hazard Assessment and Visualization Using Artificial Neural Network Method (Case Study of Lahijan County). Paper presented at the Proceedings of the 16th International Conference of the Iranian Society for Operations Research, Ramsar. [In Persian] <https://civilica.com/doc/1920698>
- Selamat, S. N., Majid, N. A., Taha, M. R., & Osman, A. (2022). Landslide Susceptibility Model Using Artificial Neural Network (ANN) Approach in Langat River Basin, Selangor, Malaysia. *Land*, *11*, 833. <https://doi.org/10.3390/land11060833>
- Sun, D., Ding, Y., Zhang, J., Wen, H., Wang, Y., Xu, J., ... & Liu, R. (2022). Essential insights into decision mechanism of landslide susceptibility mapping based on different machine learning models. *Geocarto International*, 1-29. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2146763>
- Sun, X., Chen, J., Han, X., Bao, Y., Zhan, J., & Peng, W. (2020). Application of a GIS-based slope unit method for landslide susceptibility mapping along the rapidly uplifting section of the upper Jinsha River, South-Western China. *Engineering Geology and the Environment*, *79*, 533-549. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01572-5>

- Talaei, R., & Shadfar, S. (2023). Landslide susceptibility modeling using artificial neural network and logistic regression methods at the Saqezchay Basin, south of Ardabil Province. *Watershed Engineering and Management*, 15(3), 481-503. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.360475.1996>
- Tayebi far, A. (2024). Preparing Landslide Hazard Sensitivity Maps Using Machine Learning Methods (Case Study: Kermanshah). (Master's Thesis). University of Isfahan .[In Persian]
- Wahba, M., Essam, R., El-Rawy, M., Al-Arifi, N., Abdalla, F., & Elsadek, W. M. (2024). Forecasting of flash flood susceptibility mapping using random forest regression model and geographic information systems. *Heliyon*, 10(13), e33982. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33982>
- Zakerinejad, R., & Amoshahi, N. (2022). Assessment of Landslide Hazard Using Remote sensing data and the Maximum Entropy Model (Case Study: Kome watershed, in south of Isfahan Province). *Quantitative Geomorphological Research*, 11(2), 128-149. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.340900.1349>



Morphotectonic and Seismicity Investigation in the Northern and Southeastern of Central Iran

Najime Eskandari Nesab Siahkahi¹, Majid Nemati^{2*}, Shahram Shafiei Bafti³

¹ M.Sc. Student, Department of Geology and Earthquake Research Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

^{2*} Professor, Department of Geology and Earthquake Research Group, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

³ Associate Professor, Department of Geology, Shahid Bahonar University, Kerman, Kerman, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 21 August 2022

Revised: 14 September 2022

Accepted: 24 September 2022

Available Online: 21 March 2025

Keywords:

Morphotectonic
Seismotectonics
Focal Mechanism
Active Faults
Neotectonics
Central Iran

In the present study, the tectonics and seismicity of a part of central Iran were investigated. The study area includes the Lakarkuh, Ravar, Kuhbanan, Nayband, Tabas, Posht Badam, Cheshme Rostam, Bardsir, and Rafsanjan faults. In this research, the tectonic setting and active faults of the study area were first examined. The history of seismicity in this region, based on data from the Institute of Geophysics, University of Tehran, was reviewed, along with records of contemporary earthquakes from national seismic databases. These data show clear evidence of activity along the Lakarkuh, Kuhbanan, Ravar, Tabas, and Nayband faults. The presence of fault-displaced layers in the northern part of the study area, as observed in Google Earth imagery, confirms ongoing tectonic activity. Small earthquakes mostly occurred around the Tabas, Nayband, Lakarkuh, Bardsir, Davaran, Kuhbanan, and Rafsanjan faults, while larger earthquakes were concentrated at the Shahdad–Golbaf–Lakarkuh–Kuhbanan–Nayband multiple-fault junction. Analysis of earthquake mechanisms, using the first P-motion method and waveform modeling in Seisan software, revealed that some segments of the Kuhbanan fault exhibit reverse and right-lateral strike-slip movements. Based on potential future earthquakes, cities such as Tabas, Kuhbanan, Zarand, and Kerman, as well as many villages, are highly vulnerable to human and financial losses due to severe earthquakes. After compiling all seismic data, it was concluded that the surveyed area is at risk of devastating, high-intensity earthquakes. Therefore, seismological investigations in the eastern part of central Iran and surface geomorphological studies in the northern part of central Iran are crucial for understanding both the seismic and aseismic movements of faults in the region.

*Corresponding author: Dr. Majid Nemati

E-mail address: nematimajid_1974@uk.ac.ir

How to cite this Article: Eskandari Nesab Siahkahi, N., Nemati, M., & Shafiei Bafti, S. (2025). Morphotectonic and Seismicity Investigation in the Northern and Southeastern Central Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 55-71. <https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.78334.1271>



©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 Iranian plateau, characterized by active faults, folding, volcanism, mountainous terrains, and variable crustal thickness, has historically been the site of numerous destructive earthquakes, caused by the convergence between the Eurasian and Arabian plates. In recent centuries, large-magnitude seismic events have occurred regularly, with seismicity concentrated in Central and Eastern Iran (removed "the"), particularly along orogenic belts such as the Dasht-e-Bayaz and Golbaf seismic zones. Notable events, including the 1978 Tabas, 2005 Zarand, and 2017 Hojedk earthquakes, underscore the importance of earthquake focal mechanism analysis in understanding crustal deformation patterns. Previous investigations, both global and regional, have examined active structures such as the Nayband, Kuhbanan, and Lakarkuh faults (corrected from *Lekarkuh*), integrating seismotectonic, geomorphic, and geological approaches. This study focuses on the Kuhbanan Fault and adjacent structures, assessing focal mechanisms of previously underexplored earthquakes and identifying young tectonic movements within the eastern and western sectors of Central Iran. While the eastern sector is seismically active, the western sector exhibits low seismicity, where geomorphological indicators become particularly valuable for detecting neotectonic activity.

Study Area

The investigated region forms part of Central Iran, encompassing the provinces of Kerman, Yazd, and portions of South Khorasan. This area contains numerous active faults, among which the Kuhbanan, Lakarkuh, Nayband, Golbaf, and Tabas faults are the most prominent. Geographically, the study area is located between longitudes 53°33'E and 57°53'E, and latitudes 29°59'N and 33°86'N (replaced "to" with "and" for precision).

Materials and Methods

Seismic hazard assessment was initiated by compiling a comprehensive earthquake catalog, incorporating historical events (pre-1900) from Ambraseys and Melville (2005) and instrumental records (post-1900) from the Institute of Geophysics, University of Tehran. Focal mechanisms were determined for nine earthquakes (2006–present) using P-wave first-motion polarity analysis, applying the double-couple model with P- and T-axes, following the approach of Stein and Wysession (2009). While seismotectonic analysis was prioritized in the active eastern sector of Central Iran, geomorphic and structural mapping using Google Earth imagery was employed to investigate neotectonic features in the low-seismicity western sector.

Discussion and Results

Approximately four-fifths of Iran is occupied by the folded mountain belts of the Zagros and Alborz ranges, while Central Iran comprises low-lying areas with complex tectonic structures. In the low-seismicity western sector of Central Iran, geomorphic evidence such as offsets of young strata along faults was used to infer neotectonic activity. Examples include a 3.19 km right-lateral displacement southwest of Tabas, likely associated with the northern branches of the Kuhbanan Fault, and a 1.09 km right-lateral offset near the Posht-Badam Fault.

Since 2006, a total of 6,496 earthquakes have been recorded in the study area, the majority with magnitudes below 4.0 and concentrated mainly in the eastern sector near the Kuhbanan and Lakarkuh faults. Major events include the 1923 Bardsir (M 5.5), 1981 Golbaf (M 7.1), and 2017 Hojedk (M 6.1) earthquakes. Focal mechanism analysis of nine well-constrained earthquakes (2006–2011) revealed a clustering of seismicity in the eastern part of the study area, highlighting the role of the Kuhbanan and Lakarkuh faults in accommodating active tectonic deformation.

Conclusions

Analysis of young stratal displacements in the northern and western parts of Central Iran indicates an active tectonic regime, with major structures such as the Kuhbanan and Lekarkuh faults playing a dominant role. Although the region's overall seismicity is lower than that of other tectonic provinces in Iran, most earthquakes are concentrated in its eastern sector near these principal faults. Among recorded events, nine moderate-magnitude earthquakes had sufficient data for focal mechanism analysis, predominantly showing reverse and right-lateral strike-slip motion consistent with the orientation of the Kuhbanan and Lekarkuh faults. The findings suggest a significant potential for future large and destructive earthquakes, particularly if larger fault segments become reactivated.



دسترسی آزاد

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

DOI: 10.22067/GEOEH.2022.78334.1271



مقاله پژوهشی

بررسی ریخت‌زمین‌ساخت و لرزه‌خیزی بخش شمالی و جنوب خاوری ایران مرکزی

نجیم اسکندری نسب سیاهکوهی^۱، مجید نعمتی^{۲*}، شهرام شفيعی بافتی^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد تکتونیک، گروه زمین‌شناسی و گروه پژوهشی زمین‌لرزه، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^{۲*}استاد گروه زمین‌شناسی و گروه پژوهشی زمین‌لرزه، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۳دانشیار گروه زمین‌شناسی دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>تاریخچه مقاله:</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۲۳</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۲</p>	<p>در بررسی پیش‌رو به بررسی ریخت‌زمین‌ساخت و لرزه‌خیزی بخشی از ایران مرکزی پرداخته شده است. پهنه بررسی شده در برگیرنده گسل‌های لکرکوه، رفسنجان، طبس، نایبند، بردسیر و کوهبنان و گسل‌های ایران مرکزی است. با تهیه نقشه‌های لرزه‌خیزی گستره، مشخص شد که این گستره، پیش از دوران ثبت دستگاهی و نیز دوره دستگاهی نشانه بارزی از جنبا بودن گسل‌های لکرکوه، کوهبنان، راور، طبس و نایبند را به نمایش می‌گذارد. بررسی ریخت‌شناسی سطحی در بخش شمالی ایران مرکزی با به کارگیری پیکره‌های گوگل‌ارث، جابه‌جا شدن لایه‌های سطحی توسط گسل‌های جنبا را نمایش داد. این لایه‌های جابه‌جا شده در نزدیکی گسل‌های طبس، نایبند، پشت بادام و بیابانک می‌باشند. ریززمین‌لرزه‌های برگرفته شده از شبکه لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، بیشتر در پیرامون گسل‌های طبس، نایبند، لکرکوه، بردسیر، داوران، کوهبنان و رفسنجان روی داده‌اند. زمین لرزه‌های بزرگتر در پیوست چندگانه گسل‌های شهداد - گلباف - لکرکوه - کوهبنان - نایبند روی داده‌اند. با به کارگیری شکل موج زمین‌لرزه‌ها و کاربرد روش نخستین موج P رسیده از ایستگاه‌ها در نرم‌افزار ساینز، سازوکار تکه‌هایی از گسل‌های کوهبنان و لکرکوه بر پایه حل سازوکار زمین‌لرزه‌ها، از گونه راست‌الغز راست‌بر و معکوس بوده که بیشتر در تکه‌های دیگر نیز با همین سازوکار جنبش داشته‌اند. بر پایه پراکندگی زمین لرزه‌ها، شهرهایی مانند طبس، کوهبنان، زرنند، و شهر کرمان و همچنین روستاهای زیادی در معرض خسارت‌های مالی و جانی زیادی قرار گرفته و خواهند گرفت. بنابراین، بررسی‌های لرزه‌شناسی در خاور ایران مرکزی و ریخت‌زمین‌ساخت سطحی در شمال ایران مرکزی، به ترتیب به دلیل لرزه‌خیز بودن جنبش گسل‌ها و بی‌لرزه بودن جنبش آنها بسیار مهم می‌باشد.</p>
<p>کلمات کلیدی:</p> <p>مورفوتکتونیک</p> <p>سایزمو تکتونیک</p> <p>مکانیسم کانونی</p> <p>گسل‌های فعال</p> <p>نئوتکتونیک</p> <p>ایران مرکزی</p>	

مقدمه

پهنه ایران که با گسل‌های جنب، چین‌خوردگی‌ها، فعالیت آتشفشانی، سرزمین‌های کوهستانی و ضخامت‌های متفاوت پوسته‌ای مشخص شده، در طول تاریخ، زمین‌لرزه‌های مخرب بسیاری را شاهد بوده که نتیجه آنها از دست رفتن جان و مال افراد زیادی بوده است. زمین‌ساخت جنوبی ایران در پیوند با هم‌گرایی صفحه اوراسیا و صفحه عربستان است. در قرن‌های گذشته، مردم ایران تقریباً هر ده سال، دست‌کم تجربه یک زمین‌لرزه با بزرگای بیشتر از ۷/۰ و هر دو سال یک بار، یک زمین‌لرزه با بزرگای ۶/۰ تا ۷/۰ را داشته‌اند. زمین‌لرزه‌ها در ایران مرکزی و خاور ایران پراکندگی نایک‌نواختی داشته و بیشتر در کمربندهای کوه‌زایی و چین‌خوردگی‌های تراستی که بلوک‌های تغییر شکل نیافته، بدون لرزه و مقاوم را احاطه کرده‌اند، رخ داده است (Berberian, 2005).

زمین‌لرزه‌های ایران مرکزی و خاور ایران در دو گستره، فشرده‌گی زیادی دارند؛ گستره دشت بیاض در شمال بیرجند و گستره گلباف در جنوب کرمان. در همسایگی گستره لرزه‌خیز دشت بیاض، زمین‌لرزه ویران ۱۹۷۸ طبس با بزرگای ۷/۴ روی داده که دارای ۸۵ کیلومتر گسیختگی سطحی با سازوکار معکوس بوده است. این زمین‌لرزه در پی رشد یا فراخاست کوه‌های شتری در شمال پایانه گسل نایبند روی داده است (Berberian, 1978). گسل کوه‌بنان با راستای شمال‌باختری - جنوب‌خاوری و سازوکار راستالغز راست‌بر نیز خاستگاه زمین‌لرزه‌های زیادی بوده است. زمین‌لرزه سال ۲۰۰۵ زرن کرمان با سازوکار معکوس، با یک گسل زمین‌لرزه‌ای خاوری-باختری و با بزرگای گشتاوری ۶/۴ در بخش جنوبی گسل کوه‌بنان و در پی جابه‌جایی راستالغز راست‌بر این گسل روی داده است (Walker, Jackson & Baker, 2004). سه زمین‌لرزه در ۱۲ دسامبر ۲۰۱۷ با بزرگای ۶/۲، ۶/۱، ۶/۱، در نزدیکی هجدک (شمال خاوری کرمان) رخ داد. این زمین‌لرزه‌ها در پایانه جنوبی گسل لکرکوه رخ داده‌اند. این زمین‌لرزه‌ها و پس لرزه‌های آنها نشان دهنده مهاجرت گسیختگی از جنوب خاوری به سوی شمال باختری بود (Nemati, Hajati, Rashidi & Hassanzadeh, 2020).

تفسیرهای لرزه‌زمین‌ساختی نیازمند داشتن نقشه لرزه‌خیزی و سازوکار دقیق زمین‌لرزه‌ها به ویژه زمین‌لرزه‌های بزرگ بوده که کاربردهای زیادی دارد. سازوکار زمین‌لرزه‌ها بیانگر چگونگی جابه‌جایی دو بلوک پیرامون گسل در کانون زمین‌لرزه است. از روی سازوکار زمین‌لرزه‌ها در یک گستره لرزه‌خیز به روند کلی جابه‌جایی پوسته زمین پی برده می‌شود (Nemati, 2018).

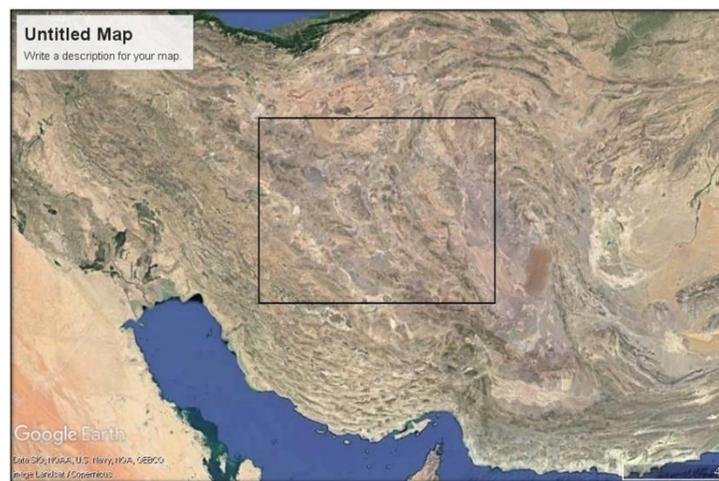
از کارهای انجام شده همانند موضوع این پژوهش می‌توان به کارهای جکسون و مک‌نزی (Jackson & McKenzie, 1984) در جهان و مرادی و همکاران (Moradi, Hatzfeld & Tatar, 2011) در ایران اشاره نمود. در کار نخست، بیش از ۸۰ حل سازوکار زمین‌لرزه، همراه با تصاویر ماهواره‌ای و همچنین لرزه‌خیزی دوره مدرن و تاریخی، گسلش و تکتونیک جنب در خاورمیانه در گستره غرب ترکیه و پاکستان بررسی شده است. مرادی و همکاران (Moradi, Hatzfeld & Tatar, 2011) نیز با حل سازوکار خردلرزه‌های گسل شمال تبریز به راست‌بر بودن و نزدیک به قائم بودن شیب این گسل پی بردند. گستره بررسی شده در این پژوهش در ایران مرکزی جای دارد. در ایران مرکزی و خاور ایران نیز می‌توان به کارهای لرزه‌شناسی نعمتی و همکاران (Nemati, et al., 2020) روی گسل لکرکوه و زمین‌لرزه‌های ۲۰۱۷ هجدک (M_w~۶/۰) و کار زمین‌شناسی و ریخت‌زمین‌ساخت سطحی فتاحی و همکاران (Fattahi, Walker, Talebian, Sloan & Rasheedi, 2011) روی گستره رفسنجان و پیرامون اشاره نمود. در ایران مرکزی، بخشی از جنبش‌های جوان گسل‌ها نیز توسط بیگی و همکاران (Beygi, Nadimi & Safaei, 2016) بررسی شده است. نعمتی و عباس‌نژاد (Nemati & Abbasnejad, 2021) نیز زمین‌ریخت‌شناسی و زمین‌ساخت جنب وابسته به گسل‌های استان کرمان را بررسی نموده‌اند. این بررسی‌ها ریخت‌زمین‌ساخت سطحی برخی از لایه‌ها و گسل‌ها را نیز در برمی‌گیرد. در این پژوهش سعی شده با توجه به اینکه در مقالات گوناگون ریخت‌زمین‌ساخت سطحی گسل کوه‌بنان بررسی شده است (Radfar & Pourkermani, 2006)، سازوکار برخی از زمین‌لرزه‌های این گسل و گسل‌های پیرامون که بررسی نشده یا به روش‌های دیگر بررسی شده‌اند و همچنین چند فعالیت‌های تکتونیکی جوان ایران مرکزی را که بیشتر شناخته شده نبودند، بررسی شود. گستره در دست بررسی در ایران مرکزی را از دیدگاه لرزه‌خیزی می‌توان به دو گستره باختری و خاوری (هر دو جنب) دسته‌بندی نمود. جنبش گستره خاوری به‌گونه لرزه‌خیز و گستره باختری تقریباً

بی‌لرزه است. از دیدگاه لرزه‌خیزی، چون گسترهٔ باختری ایران مرکزی اصلاً لرزه‌خیزی کمی دارد، بنابراین کوشش شده که در صورت داشتن تغییرات سطحی ژئومورفولوژی، بیشتر به کمک این روش بررسی گردد.

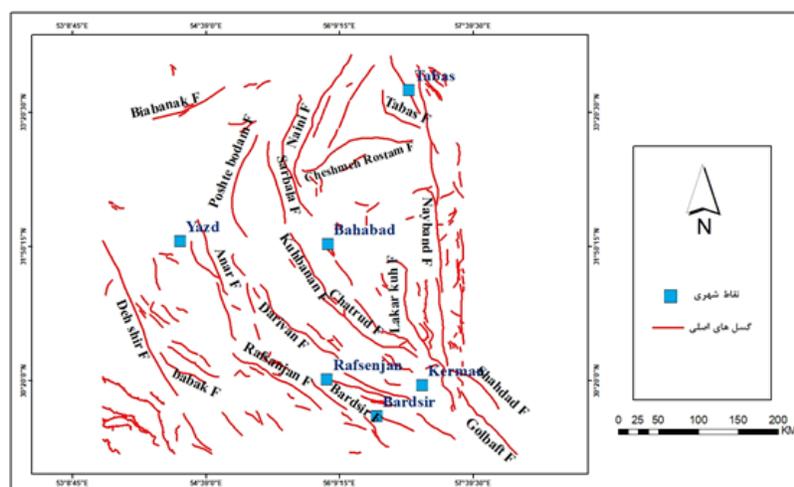
منطقه مورد مطالعه

گسترهٔ بررسی شده، بخشی از ایران مرکزی بوده و استان‌های کرمان، یزد و بخشی از خراسان جنوبی را در برمی‌گیرد. این گستره، دارای گسل‌های زیادی است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به گسل کوهینان، لکرکوه، نایبند، گلیاف، طبس و... اشاره کرد. این گستره، در طول‌های جغرافیایی بین ۵۳ درجه ۳۳ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۵۳ دقیقه خاوری و عرض‌های جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۹ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۸۶ دقیقه شمالی جای دارد (شکل ۱).

(الف)



(ب)



شکل ۱- گسترهٔ بررسی شده (الف) همراه با شهرها و گسل‌های مهم (ب)

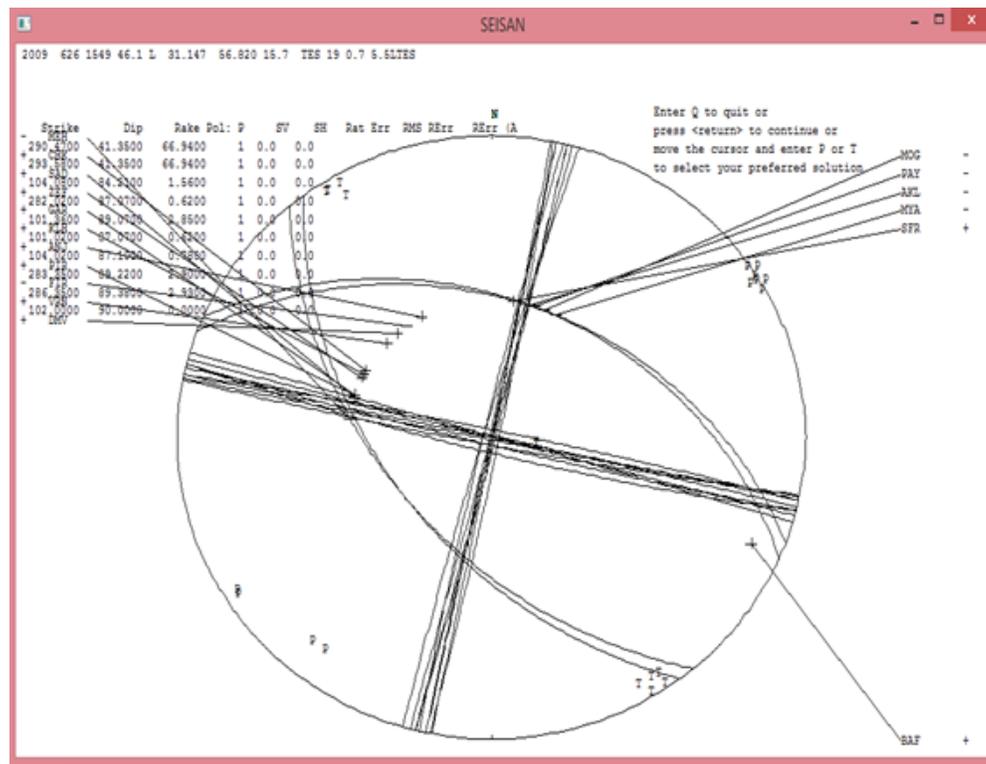
Fig.1. The study area (a) with major cities and faults (b)

مواد و روش‌ها

نخستین کار پایه‌ای برای انجام تحلیل خطر لرزه‌خیزی، تهیه کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها در گستره، است. بنابراین لازم است کلیه کاتالوگ‌های زمین‌لرزه‌ها، که کامل‌ترین اطلاعات از زمین‌لرزه‌های تاریخی (قبل از ۱۹۰۰ میلادی) و دستگاهی (بعد از ۱۹۰۰ میلادی) را دارند، در اختیار داشته باشیم. این داده‌ها را به ترتیب از آمبراسیس و ملویل (Ambraseys & Melville, 2005) و مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران برگرفته شدند.

یکی از روش‌های کارآمد به دست آوردن سازوکار زمین‌لرزه‌ها، به کارگیری قطبش پرتوهای P زمین‌لرزه است. در این روش که برای خردلرزه‌ها در همه بزرگاها و همه فواصل روکانونی نیز انجام‌پذیر است، قطبش پرتوهای P زمین‌لرزه‌ها روی دایره سازوکار به کمک دو صفحه گسلی و عمود بر آن جدا شده و سازوکار زمین‌لرزه حل می‌گردد. روی این دایره دو گستره فشاری با ایستگاه‌هایی با قطبش بالا (فشاری) و دو گستره کششی با قطبش پایین (کششی) هستند. در تحلیل سازوکار کانونی، معمولاً کانون زمین‌لرزه را به صورت یک نقطه در نظر می‌گیریم و در این نقطه به‌گونه نظری یک سیستم نیرو شامل دو جفت نیرو فرض می‌شود که به آن الگوی دو زوجی معادل گفته می‌شود. در این الگو، دو جفت نیرو در خلاف جهت یکدیگرند و از نظر بزرگی مساوی هستند. این نیروها در حول نقطه کانونی، گشتاور حاصل از یکدیگر را خنثی می‌کنند. این مدل را می‌توان با یک سیستم نیرو شامل محورهای کششی T در گستره فشاری و محورهای فشاری P در گستره کششی جایگزین کرد، به‌گونه‌ای که دو نیرو به سوی کانون (P) و دو نیرو به سوی خارج از کانون (T) امتداد داشته باشند (Stein & Wysession, 2009). در این پژوهش پس از تهیه نقشه لرزه‌خیزی سازوکار شماره ۹ زمین‌لرزه از ۲۰۰۶ تاکنون حل شده و بررسی می‌شوند.

اگرچه در گستره لرزه‌خیز خاور ایران مرکزی، طبیعتاً بررسی‌های لرزه‌خیزی اولویت دارند، در گستره تقریباً بی‌لرزه باختر ایران مرکزی ریخت‌زمین‌ساخت گستره و جابه‌جایی لایه‌ها با به‌کارگیری پیکره‌های ماهواره‌ای گوگل‌ارث نیز بررسی شده است. برای به دست آوردن سازوکار زمین‌لرزه‌ها در گستره، از داده‌های ثبت شده، توسط ایستگاه‌های مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران که روی سایت^۱ این مؤسسه قرار داده شده است، استفاده کردیم. این داده‌ها شامل شکل موج زمین‌لرزه‌های ثبت شده از تاریخ ۲۰۰۶/۰۱/۰۱ تا تاریخ ۲۰۲۲/۱۲/۰۱ با بزرگای بزرگتر از ۴/۰ هستند. داده‌ها را که ابتدا به صورت Y-file و به شکل zip file روی سایت مؤسسه ژئوفیزیک می‌باشند، برای هر زمین‌لرزه چندین داده (به دلیل اینکه هر ایستگاه می‌تواند در سه راستای قائم، شمال-جنوب و خاور-باختر ۳ مؤلفه موج برای هر زمین‌لرزه به ما بدهد و با توجه به تعداد ایستگاه‌ها، تعداد زیادی داده لرزه‌ای برای هر زمین‌لرزه خواهیم داشت) به فرمت y-file دریافت می‌کنیم سپس آن‌ها را جداگانه در سیستم عامل داس و به وسیله دستورهای ویژه‌های فایل‌های هر زمین‌لرزه به فرمت نرم‌افزار ساین تبدیل فرمت می‌کنیم (Abre Dari & Mansouri, 2009). این نرم‌افزار، یک نرم‌افزار متشکل از برنامه‌های رایانه‌ای مختلف بوده و این برنامه‌ها که هر کدام کار متفاوتی روی زمین‌لرزه‌ها انجام می‌دهند، بر پایه زبان برنامه‌نویسی فترن کار می‌کنند. این نرم‌افزار فایل‌های متنی حاوی زمان رسید فازهای لرزه‌ای (اس‌فایل) و همچنین شکل موج زمین‌لرزه‌ها را با فرمت مخصوص به خود به‌عنوان ورودی می‌خواند. این نرم‌افزار دارای قابلیت‌ها و توانایی‌های بسیاری مانند به دست آوردن بزرگا، بررسی طیفی زمین‌لرزه، کانون‌یابی و حل سازوکار زمین‌لرزه‌ها است.



شکل ۲- یک نمونه سازوکار تجمعی؛ سازوکار زمین لرزه ۲۶/۰۶/۲۰۰۹. این زمین لرزه روی تکه میانی گسل لکرکوه روی داده است.

Fig.2. An example of an accumulation mechanism: the mechanism of the 26/06/2009 earthquake. This earthquake occurred on the middle segment of the Lakirkhu fault.

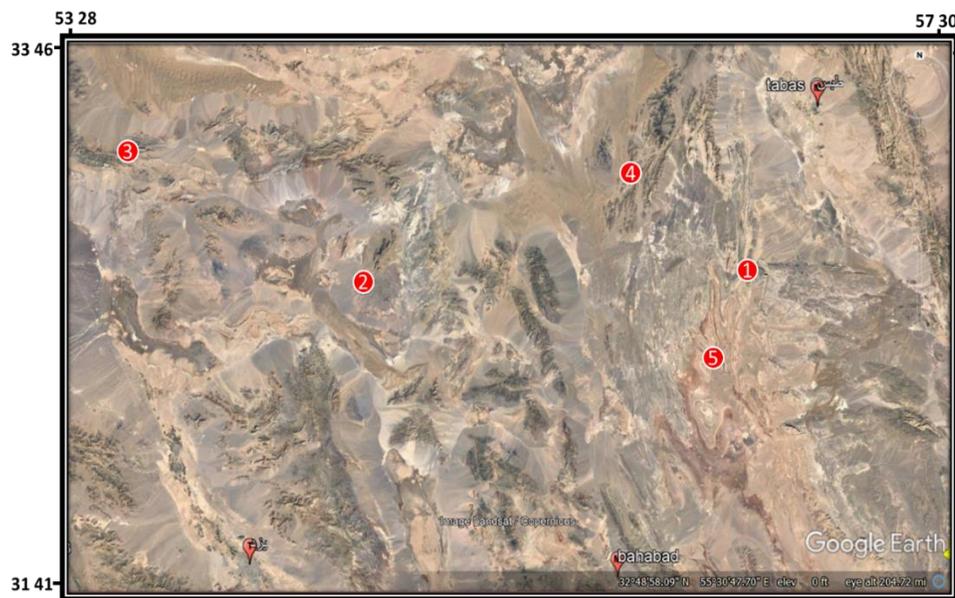
زمین لرزه‌ها را بر پایه تاریخ سال و ماه در پوشه ویژه خود ذخیره می‌کنیم؛ برای هر موج یک زمین لرزه بر پایه شکل موج پلاریته فشارشی و کششی انتخاب می‌کنیم و بعد از اتمام موج‌های یک زمین لرزه با کمینه کردن خطاها و تعداد درجه آزادی، شمار حل‌های به دست آمده را به دست آورده و در پایان دایره سازوکار را ترسیم می‌کنیم (شکل ۲).

با به کارگیری این روش حل سازوکار زمین لرزه، سازوکار ۹ زمین لرزه با بزرگای بالای ۴/۰ به دست آورده شد. همچنین، برای بخش شمالی گستره با به کارگیری گوگل‌ارث جابه‌جایی لایه‌ها را در ۵ گستره به دست آورده‌ایم. با به کارگیری داده‌های مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و نرم‌افزار Arc Gis نقشه لرزه‌خیزی گستره نیز مورد بحث قرار گرفت.

نتایج و بحث

زمین‌ریخت‌شناسی

در مجموع چهارپنجم سطح ایران را رشته چین‌خوردگی‌های زاگرس و البرز فراگرفته‌اند. بخش مرکزی ایران از زمین‌های پست تشکیل شده که برخی بخش‌هایی از آن ساختارهای زمین‌ساختی درهم و پیچیده دارند. در این بخش‌ها بریدگی‌ها و شکست‌هایی وجود دارند که شن‌زارها و نمک‌زارهای بزرگ در میان آن‌ها تکوین یافته‌اند. یکی از راه‌های بررسی گستره‌های جنب و بی‌لرزه مانند باختر ایران مرکزی، بررسی تغییرات ریخت‌شناسی سطحی است. شکل ۳، موقعیت لایه‌های جابه‌جا شده توسط گسل‌ها در ایران مرکزی نشان می‌دهد.



شکل ۳- موقعیت لایه های جابه جا شده توسط گسل ها

Fig.3. Location of layers displaced by faults

دلیل بررسی جابه جایی لایه ها نشان دادن جنبش های جوان است. چون گسل ها، لایه های جوان را جابه جا کرده اند پس گسل ها نیز جوان هستند. در این پژوهش لایه هایی که توسط گسل ها بریده و جابه جا شده اند، آورده شده اند. در پیکره های ۴ تا ۸، مقیاس در گوشه پایین و راست پیکره، آورده شده است.

شکل ۴، جابه جایی یک لایه را که در ۷۱ کیلومتری جنوب باختری شهرستان طبس رخ داده است، نشان می دهد (شماره ۱). اندازه این جابه جایی ۳/۱۹ کیلومتر برآورد شده و به گونه راست بر است. به گمان، این جابه جایی توسط شاخه های شمالی گسل کوهبنان انجام شده است.

در شکل ۵، در نزدیکی گسل پشت بادام رخ داده است (شماره ۲). اندازه این جابه جایی ۱/۰۹ کیلومتر بوده و به گونه راست بر است. در این پیکره ها گسل با خم آبی و لایه با خم قرمز نشان داده شده است.



شکل ۴- جابه‌جایی لایه در موقعیت شماره یک با توجه به شکل ۳

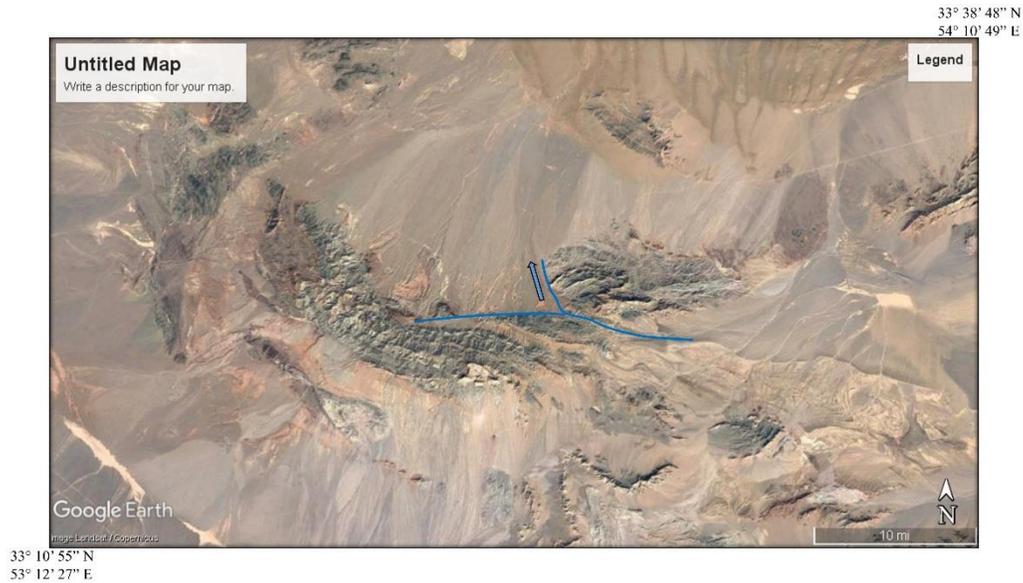
Fig.4. Displacement of the layer at position number one according to Fig. 3



شکل ۵- جابه‌جایی لایه در موقعیت شماره دو با توجه به شکل ۳

Fig.5. Displacement of the layer at position number two according to Fig. 3

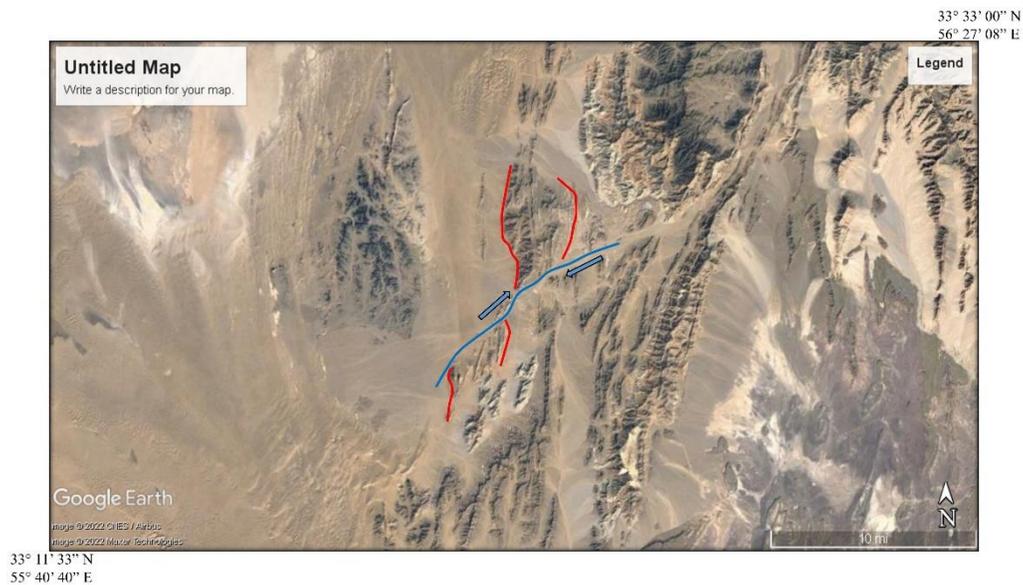
جابه‌جایی شماره ۳ در شکل ۶ نشان داده شده است. این جابه‌جایی در شمال باختری گستره و در پایانه گسل دهشیر رخ داده است. اندازه این جابه‌جایی ۳/۹۶ کیلومتر برآورد شده است. در آن بلوک شمالی توسط گسل (خم آبی) به سوی شمال خاور رانده شده است.



شکل ۶- جابه‌جایی لایه در موقعیت شماره سه با توجه به شکل ۳

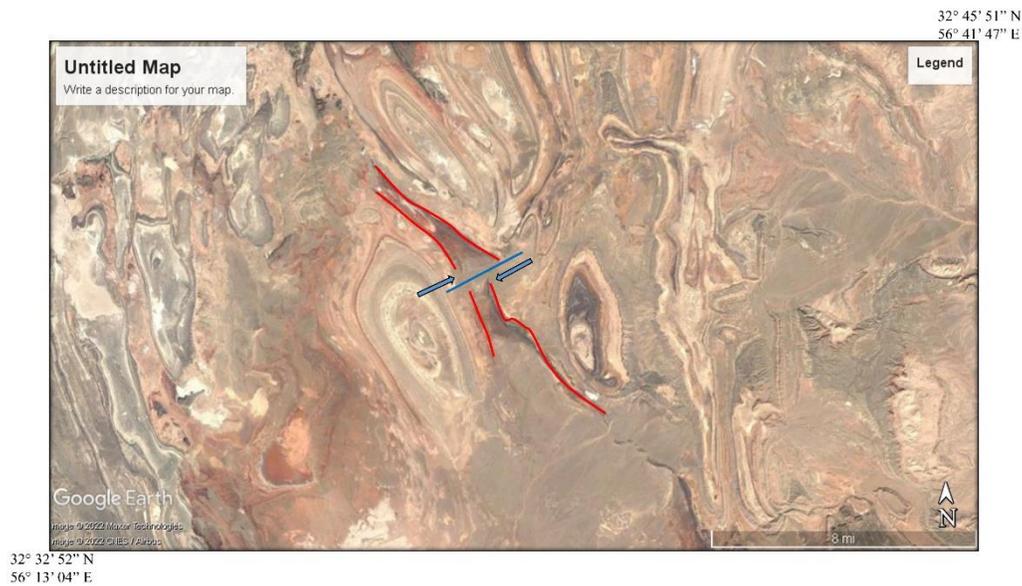
Fig.6. Layer displacement at position number three according to Fig. 3

این جابه‌جایی که در شکل ۷ نشان داده شده است (شماره ۴)، در ۸۳ کیلومتری باختر شهرستان طبس روی داده است. اندازه این جابه‌جایی که راست‌بر می‌باشد، ۵ کیلومتر بوده است. برآورد این جابه‌جایی‌ها به کمک مقیاس فاصله‌ای گوگل‌ارت انجام شده است.



شکل ۷- جابه‌جایی لایه در موقعیت شماره چهار با توجه به شکل ۳

Fig.7. Displacement of the layer at position number four according to Fig. 3



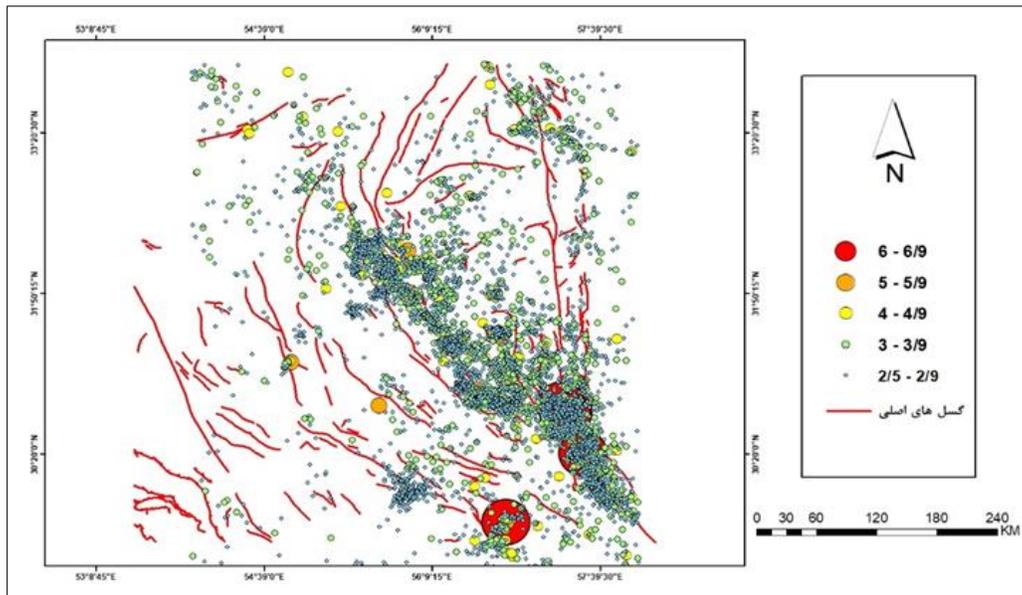
شکل ۸- جابه‌جایی لایه در موقعیت شماره پنج با توجه به شکل ۳
Fig.8. Layer displacement at position number five according to Fig 3

شکل ۸ جابه‌جایی شماره ۵ را نشان می‌دهد که در آن گسل، لایه‌های چین‌ها را جابه‌جایی کرده است. این جابه‌جایی در ۹۷ کیلومتری شمال خاوری شهرستان بهاباد است. اندازه این جابه‌جایی ۱/۲۳ کیلومتر بوده و به‌گونه راست‌بر است.

لرزه‌خیزی

با توجه به شکل ۹، شمار ۶۴۹۶ زمین‌لرزه در گستره مورد بررسی در بازه زمانی پس از سال ۲۰۰۶ رخ داده است. با توجه به قانون گوتنبرگ - ریشتر و اینکه شمار رخداد زمین‌لرزه‌ها با بزرگای، رابطه عکس دارند (شمار زمین‌لرزه‌های روی داده با بزرگای کمتر، بیشتر است)، می‌توان گفت که بیشتر این زمین‌لرزه‌ها با بزرگای کمتر از ۴/۰ هستند. زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۴/۰ تا ۵.۵ بیش‌تر در خاور گستره مورد بررسی رخ داده‌اند. بیشتر زمین‌لرزه‌ها در بخش شمالی ایران مرکزی روی گسل کوهبنان و همچنین در پیرامون گسل لکرکوه رخ داده‌اند. خرد زمین‌لرزه‌ها در کل، بیشتر در پیرامون گسل‌های طبس، نایبند، لکرکوه، گلباف، بردسیر، داوران، کوهبنان و رفسنجان روی داده‌اند.

این نقشه با به‌کارگیری داده‌های مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران ترسیم شده است و اینکه خطای میانگین این زمین‌لرزه‌ها ۵ کیلومتر می‌باشد، این زمین‌لرزه‌ها احتمالاً بیشتر وابسته به گسل‌های لکرکوه، گلباف و کوهبنان می‌باشند. بزرگترین زمین‌لرزه‌های گستره، زمین‌لرزه‌های ۱۹۲۳ بردسیر (M ۵/۵)، ۱۹۸۱ گلباف (M ۷/۱) و ۲۰۱۷ هجدک (M ۶/۱) (نشان‌گرهای بزرگ قرمز) هستند. همان‌گونه که در نقشه می‌بینیم، باختر ایران مرکزی لرزه‌خیزی چندانی ندارد.



شکل ۹- زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیش‌تر از ۲.۵، به همراه گسل‌های مهم گستره مورد بررسی با به‌کارگیری داده‌های مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران از سال ۲۰۰۶ تا سال ۲۰۲۲

Fig.9. Earthquakes with a magnitude greater than 2.5, along with important faults in the studied area, using data from the Institute of Geophysics, University of Tehran, from 2006 to 2022.

سازوکار زمین‌لرزه‌ها

در واقع یکی از جنبه‌های زمین‌ساخت جنبا وجود زمین‌لرزه‌ها بوده و مهم‌ترین ویژگی زمین‌لرزه‌ها سازوکار آنها است. در این پژوهش، پس از بررسی و پردازش امواج زمین‌لرزه‌ها از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۱ سازوکار کانونی ۹ زمین‌لرزه به‌دست آمد. برای حل سازوکارها تعداد پلاریته‌های بالای ۸ و خطای پلاریته‌های کمتر از ۲ و همچنین بزرگای بین ۴/۰ تا ۵/۸ را بررسی نمودیم. نبود آزیموتی یا Azimuth همه زمین‌لرزه‌ها کمتر از ۱۸۴ بوده که عدد قابل قبولی است. این پارامتر نشان می‌دهد پوشش ایستگاهی زمین‌لرزه تا چه اندازه قابل قبول است (هرچه کمتر باشد پوشش ایستگاهی و دقت موقعیت زمین‌لرزه بیشتر است). مشخصات این زمین‌لرزه‌ها در جدول ۱ آمده است:

این ۹ زمین‌لرزه دقیق‌ترین و بهترین سازوکارها و کمترین خطا را داشته‌اند. در پایان همه سازوکار زمین‌لرزه‌ها روی نقشه گستره پیاده می‌شوند. تجمع بیشتر زمین‌لرزه‌ها در بخش خاور گستره مورد بررسی و در نزدیکی گسل کوهبنان و لکرکوه است (شکل ۱۰). RMS زمین‌لرزه‌ها نیز خطای زمانی آنها است.

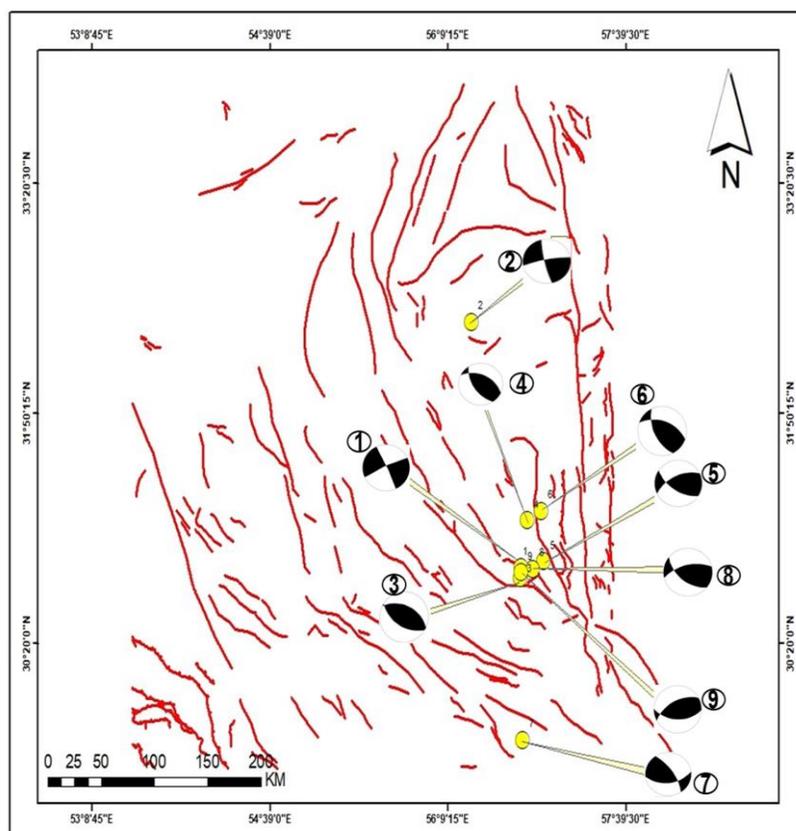
سازوکار زمین‌لرزه شماره یک (۲۰۰۶/۱۰/۰۹)

این زمین‌لرزه در تاریخ ۲۰۰۶/۱۰/۰۹ و در عرض ۳۰/۸ و طول ۷۷/۵۶ درجه جغرافیایی با بزرگای ۴/۹ در ۲۰ کیلومتری خاور شهرستان زرد و در نزدیکی گسل کوهبنان روی داده است. روند این گسل شمال باختری - جنوب خاوری می‌باشد. سازوکار این زمین‌لرزه از گونه راستالغز راست‌بر و شیب گسل در این ناحیه قائم می‌باشد.

جدول ۱- فهرست زمین لرزه‌هایی که سازوکار آنها در این پژوهش به دست آمده است. در این جدول AG، CF، SS، RL، PR و R به ترتیب مخفف نبود آزیموتی (Azimuth gap)، گسل مسبب (Causative fault)، راستالغز (Strike slip)، راست‌بر (Right lateral)، معکوس خالص (Pure reverse) و معکوس (Reverse) می‌باشند.

Table 1 - List of earthquakes whose mechanisms were obtained in this study. In this table, AG, CF, SS, RL, PR, and R stand for Azimuth gap, Causative fault, Strike slip, Right lateral, Pure reverse, and Reverse, respectively.

NO	Date	Lat (°N)	Long (°E)	Depth (km)	Mag (M _N)	RMS (Sec)	AG (°)	CF	Mechanism
1	10/9/2006	30.8	56.8	10	4.9	0.4	131	Kuhbanan	SS-RL
2	12/2/2008	32.4	56.4	19/9	4.5	0.5	125	-	SS-RL
3	3/7/2009	30.8	56.8	8.3	4.3	0.3	129	Kuhbanan	PR
4	6/26/2009	31.1	56.8	5	4.3	0.4	126	LakarKuh	R-SS-RL
5	1/26/2010	30.9	57	21.2	4.3	0.4	133	LakarKuh	R-SS-RL
6	3/1/2010	31.2	56.9	4	4	0.4	184	LakarKuh	R-SS-RL
7	7/31/2010	29.7	56.8	4	5.8	0.4	110	-	R-SS-RL
8	9/15/2010	30.8	56.8	6.7	4.5	0.5	97	Kuhbanan	R-SS-RL
9	12/16/2011	30.8	56.8	6	4.1	0.4	92	Kuhbanan	PR



شکل ۱۰- نقشه موقعیت و سازوکار زمین لرزه‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۱

Fig. 10. Map of the location and mechanism of earthquakes from 2006 to 2011

سازوکار زمین لرزه شماره دو (۲۰۰۸/۱۲/۰۲)

این زمین لرزه، در تاریخ ۲۰۰۸/۱۲/۰۲ و در عرض جغرافیایی ۳۲/۴۴ و طول ۵۶/۳۵ درجه جغرافیایی، با بزرگای ۴/۵ در ۷۱ کیلومتری شمال خاوری شهرستان بهاباد و در نزدیکی شمال گسل کوهبنان روی داده است (جدول ۱). سازوکار این زمین لرزه از گونه راست‌الغز راست‌بر (با راستای گسلی (NNW-SSE) و شیب گسل در این ناحیه قائم می‌باشد.

سازوکار زمین لرزه شماره سه (۲۰۰۹/۰۳/۰۷)

این زمین لرزه در تاریخ ۲۰۰۹/۰۳/۰۷ و در عرض ۳۰/۷۶ درجه و طول ۵۶/۷۶ درجه جغرافیایی، با بزرگای ۴/۳ در ۵ کیلومتری خاور روستای داهویییه (زرنند) و در نزدیکی گسل کوهبنان روی داده است. سازوکار این زمین لرزه از گونه معکوس خالص بوده (NW-SE) و شیب گسل در این ناحیه نزدیک به ۷۰ درجه به دست آمده است.

سازوکار زمین لرزه شماره چهار (۲۰۰۹/۰۶/۲۶)

این زمین لرزه در تاریخ ۲۰۰۹/۰۶/۲۶ در عرض ۳۱/۱۴ درجه و طول ۵۶/۸۲ درجه جغرافیایی، با بزرگای ۴/۳ در ۱۳ کیلومتری جنوب شهرستان راور و در نزدیکی خم جنوبی گسل لکرکوه رویداده است. سازوکار این زمین لرزه از گونه معکوس و یک مؤلفه راست‌الغز کوچک هم دارد.

سازوکار زمین لرزه شماره پنج (۲۰۱۰/۰۱/۲۶)

این زمین لرزه در تاریخ ۲۰۱۰/۰۱/۲۶ و در عرض ۳۰/۸۷ و طول ۵۶/۹۶ درجه جغرافیایی، با بزرگای ۴/۳ در ۳۶ کیلومتری شمال خاور شهرستان زرنند و در جنوب گسل کوهبنان روی داده است. سازوکار این زمین لرزه راست‌بر با مؤلفه معکوس (با راستای گسلی (NW-SE) می‌باشد.

سازوکار زمین لرزه شماره شش (۲۰۱۰/۰۳/۰۱)

این زمین لرزه در تاریخ ۲۰۱۰/۰۳/۰۱ و در عرض ۳۱/۲۰ و طول ۵۶/۹۴ درجه جغرافیایی، با بزرگای ۴/۰، در ۱۳ کیلومتری خاور شهرستان راور و در خم شمالی گسل لکرکوه رویداده است. سازوکار این زمین لرزه از نوع معکوس (NNW-SSE) بوده و مؤلفه امتداد لغز کوچک هم دارد.

سازوکار زمین لرزه شماره هفت (۲۰۱۰/۰۷/۳۱)

این زمین لرزه در تاریخ ۲۰۱۰/۰۷/۳۱ و در عرض ۲۹/۷۰ و طول ۵۶/۷۸ درجه جغرافیایی، با بزرگای ۵/۸ در ۱۱ کیلومتری شمال روستای قلعه عسگر واقع در جنوب شهرستان بردسیر رخ داده است. این زمین لرزه به گمان در اثر فعالیت گسل لاله زار و یا سایر گسل‌های فرعی سوی شمال آن رخ داده است. سازوکار این زمین لرزه از نوع معکوس (NW-SE) و مؤلفه امتداد لغز کوچک راست‌بر هم دارد.

سازوکار زمین لرزه شماره هشت (۲۰۱۰/۰۹/۱۵)

این زمین لرزه در تاریخ ۲۰۱۰/۰۹/۱۵ و در عرض ۳۰/۸۲ و طول ۵۶/۸۹ درجه جغرافیایی، با بزرگای ۴/۵، در ۲۹ کیلومتری خاور شهرستان زرنند و در نزدیکی جنوب گسل کوهبنان روی داده است. سازوکار این گسل از نوع معکوس و مؤلفه امتداد لغز کوچک هم دارد (NW-SE).

سازوکار زمین لرزه شماره نه (۲۰۱۱/۱۲/۱۶)

این زمین لرزه در تاریخ ۲۰۱۱/۱۲/۱۶ در عرض ۳۰/۸۰ و طول ۵۶/۷۷ درجه جغرافیایی، با بزرگای ۴/۱ و در ۱۹ کیلومتری خاور شهرستان زرنند و نزدیکی جنوب گسل کوهبنان روی داده است. سازوکار این زمین لرزه از نوع معکوس خالص می‌باشد. راستای گسل در این گستره خاوری باختری به دست آمده است.

نتیجه گیری

زمین ریخت شناسی

از بررسی جابه جایی لایه ها توسط گسل ها در مناطق شمالی گستره بررسی شده می توان نتیجه گرفت که گسل های جوان باعث جابه جایی لایه ها شده و این گستره ها از دیدگاه تکتونیکی جنبا می باشند. این جابه جایی لایه ها در جنوب باختری و باختر شهرستان طبس، در نزدیکی گسل پشت بادام، در شمال خاوری شهرستان بهاباد و همچنین در بخش شمال باختری ایران مرکزی رخ داده اند. اگرچه، این نکته مهم را نباید از نظر دور نگه داشت که، بیشتر گسل ها ممکن است هر دو شیب لغز و امتداد لغز را داشته باشند، که در تصاویر ماهواره ای مؤلفه شیب لغز زیاد قابل تشخیص نیست، بنابراین ممکن است هر نوع گسلی باشد. همچنین، اشکال مدور می توانند پیامد نفوذ گنبد نمکی باشد، بنابراین نفوذ گنبد های نمکی هم می تواند باعث شکل گیری گسل های فرعی شود.

لرزه خیزی

ایران مرکزی نسبت به خاور ایران، البرز، زاگرس و آذربایجان از لرزه خیزی کمتری برخوردار است. با توجه به نقشه لرزه خیزی بیشتر زمین لرزه ها در بخش خاور گستره ایران مرکزی و در پیرامون گسل های کوهبنان، لکرکوه، گلباف و نایبند روی داده اند. زمین لرزه های بزرگ و خرد لرزه های زیادی در پیوست سه گانه گسل های شهداد - گلباف - لکرکوه - کوهبنان - نایبند روی داده اند. چند زمین لرزه با بزرگای میانه و خرد لرزه های بسیار پراکنده در باختر ایران مرکزی روی داده اند.

سازوکار زمین لرزه ها

از میان کل زمین لرزه ها، تنها ۹ زمین لرزه با بزرگای میانه دارای داده های از دیدگاه کمی و کیفی برای حل سازوکار مناسب بودند. از میان این زمین لرزه ها، زمین لرزه نخست در تاریخ ۲۰۰۶/۱۰/۰۹ با بزرگای ۴/۹ در ۲۰ کیلومتری خاور شهرستان زرنند و در نزدیکی گسل کوهبنان، دومی، در ۲۰۰۸/۱۲/۰۲ با بزرگای ۴/۵ در ۷۱ کیلومتری شمال خاوری شهرستان بهاباد و در نزدیکی شمال گسل کوهبنان، زمین لرزه ای در تاریخ ۲۰۰۹/۰۳/۰۷ با بزرگای ۴/۳ در ۵ کیلومتری خاور روستای داهوییه (زرنند) و در نزدیکی گسل کوهبنان، زمین لرزه ای در تاریخ ۲۰۰۹/۰۶/۲۶ با بزرگای ۴/۳ در ۱۳ کیلومتری جنوب شهرستان راور و در نزدیکی خم شمالی (سازوکار معکوس) گسل لکرکوه، زمین لرزه ای در تاریخ ۲۰۱۰/۰۱/۲۶ با بزرگای ۴/۳ در ۳۶ کیلومتری شمال خاور شهرستان زرنند (نزدیک به روکانون زمین لرزه ۲۰۰۵) و در جنوب گسل کوهبنان، زمین لرزه ای در تاریخ ۲۰۱۰/۰۳/۰۱ بزرگای ۴/۰ در ۱۳ کیلومتری خاور شهرستان راور و در خم شمالی گسل لکرکوه، زمین لرزه ای دیگر در تاریخ ۲۰۱۰/۰۷/۳۱ با بزرگای ۵/۸ و در ۱۱ کیلومتری شمال روستای قلعه عسگر واقع در جنوب شهرستان بردسیر (نزدیک به روکانون زمین لرزه های ۱۹۲۳ و ۲۰۱۰) رخ داده، زمین لرزه ای نیز در تاریخ ۲۰۱۰/۰۹/۱۵ با بزرگای ۴/۵ باز هم در ۲۹ کیلومتری خاور شهرستان زرنند و در نزدیکی جنوب گسل کوهبنان روی داده و سرانجام زمین لرزه ای در تاریخ ۲۰۱۱/۱۲/۲۶ با بزرگای ۴/۱ و در ۱۹ کیلومتری خاور شهرستان زرنند و نزدیکی جنوب گسل کوهبنان روی داده است. جنوب گسل کوهبنان میزبان زمین لرزه های با بزرگای ۴/۰ تا ۵/۸ بوده است. سازوکار بیشتر این زمین لرزه ها معکوس و راستالغز راست بر با یک پهنه گرهی هم راستا با گسل های کوهبنان و لکرکوه می باشد. از امتیازات این پژوهش حل سازوکارها با روشی متفاوت و عدم تکیه بر روش های پیشین برای تفسیرهای لرزه زمین ساختی می باشد. حل بیشتر سازوکارها با این روش با اندکی تفاوت در شیب، راستا و لغزش گسل ها، تا اندازه زیادی مؤید روش های پیشین بوده و حل این سازوکارها در تناقض با حل دیگر زمین لرزه ها در این گستره نیست.

سازوکارهای به دست آمده از زمین لرزه‌ها و سازوکار زمین‌شناسی سطحی گسل‌ها نشان می‌دهد، بیشتر زمین‌لرزه‌ها وابسته به گسل کوهبنان و لکرکوه بوده و سازوکار آن را تأیید می‌کنند. معمولاً در لرزه‌شناسی، برای منطقی بودن محاسبات، رفتار زمین را از دیدگاه لرزه‌ای در گذشته و آینده یکسان فرض می‌کنند که اگرچه فرض کاملاً درستی نیست، منطقی است. با توجه به این موضوع و پس از بررسی‌های دقیق‌تر می‌توان گفت رخداد این زمین‌لرزه‌ها در گستره بررسی شده در شرایط کنونی نشان‌گر این موضوع مهم است که این گستره در خطر رخداد زمین‌لرزه‌های آینده ویران‌گر با شدت زیاد می‌باشد. چرا که با رخداد زمین‌لرزه‌های اخیر، گمان اینکه تکه‌های بزرگتری از گسل‌های لکرکوه و کوهبنان جنبا شوند زیاد می‌باشد.

سپاسگزاری

از گروه پژوهشی زمین‌لرزه دانشگاه شهید باهنر کرمان، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله به دلیل در اختیار گذاردن داده‌های ایستگاه‌های لرزه‌ای خود سپاس‌گزاری می‌شود.

References

- Abre Dari, S. H., & Mansouri, R. (2009). Data Conversion and Practical Introduction to SEISAN Seismic Data Analysis Software. Tehran: Danesh Negar Publications. [In Persian]
- Ambraseys, N. N., & Melville, C. P. (2005). *A history of Persian earthquakes*. Cambridge University Press.
- Berberian, M. (1978). Tabas-e-Golshan (Iran) catastrophic earthquake of 16 September 1978; a preliminary field report. *Disasters*, 2(4), 207-219. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.1978.tb00099.x>
- Berberian, M. (2005). The 2003 Bam urban earthquake: a predictable seismotectonic pattern along the western margin of the rigid Lut block, southeast Iran. *Earthquake Spectra*, 21(1_suppl), 35-99. <https://doi.org/10.1193/1.2127909>
- Beygi, S., Nadimi, A., & Safaei, H. (2016). Tectonic history of seismogenic fault structures in Central Iran. *Journal of Geosciences*, 61(2), 127-144. <http://doi.org/10.3190/jgeosci.212>
- Fattahi, M., Walker, R. T., Talebian, M., Sloan, R. A., & Rasheedi, A. (2011). The structure and late Quaternary slip rate of the Rafsanjan strike-slip fault, SE Iran. *Geosphere*, 7(5), 1159-1174. <http://dx.doi.org/10.1130/GES00651.1>
- Jackson, J., & McKenzie, D. (1984). Active tectonics of the Alpine—Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan. *Geophysical Journal International*, 77(1), 185-264. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1984.tb01931.x>
- Moradi, A. S., Hatzfeld, D., & Tatar, M. (2011). Microseismicity and seismotectonics of the North Tabriz fault (Iran). *Tectonophysics*, 506(1-4), 22-30. <https://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2011.04.008>
- Nemati, M. (2018). Fundamentals of Seismology with a Special Look at Seismology in Iran. Shahid Bahonar University of Kerman Press. [In Persian]
- Nemati, M., & Abbasnejad, A. (2021). Geomorphology and active tectonic related to the faults in Kerman Province, SE Iran. *Journal of Tectonics*, 5(17), 74-92. [In Persian] <https://doi.org/10.22077/jt.2021.4176.1109>
- Nemati, M., Hajati, F. J., Rashidi, A., & Hassanzadeh, R. (2020). Seismology of the 2017 Hojedd earthquakes (MN 6.0–6.1), Kerman province, SE Iran. *Tectonophysics*, 780, 228398. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228398>
- Radfar, S., & Pourkermani, M. (2006). Morphotectonic of Kuhbanan Fault. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 15(58), 166-183. [In Persian] https://www.gsjournal.ir/article_213910.html
- Stein, S., & Wysession, M. (2009). *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*. John Wiley & Sons.
- Walker, R., Jackson, J., & Baker, C. (2004). Active faulting and seismicity of the Dasht-e-Bayaz region, eastern Iran. *Geophysical Journal International*, 157(1), 265-282. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.02179.x>



Assessing the Effects of Land Use Change on Flood Occurrence in the Mordaq Chai Watershed Using the SWAT and Artificial Neural Network Models

Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam ^{1*}, Atefeh Haghighat ²,
Tohid Rahimpour ³, Abdollah Behboody ⁴

¹Professor in Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz and Iranian Hazardology Association, Tabriz, Iran

²M. Sc in Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³ Postdoctoral Researcher in Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

⁴ Ph.D in Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 14 March 2025

Revised: 24 May 2025

Accepted: 12 June 2025

Available Online: 13 June 2025

Keywords:

Land Use Change

Flood Risk Assessment

Hydrological Modeling

Watershed Management

SWAT Model

Over the past few decades, significant changes have occurred in the Mardagh Chay watershed, primarily due to the development of agricultural lands, the expansion of settlements, and other activities. During this period, several events such as surface flows and river overflows have taken place, leading to flooding in settlements and damage to infrastructure. Accordingly, the present study examines and evaluates the impact of land use changes on flooding in the Mardagh Chay watershed in East Azerbaijan Province. First, land use classification was performed using an artificial neural network model, and land use maps were generated for 2001, 2011, and 2021. Subsequently, the SWAT model was applied to the classification results. According to the findings, over a period of twenty years, with the exception of barren lands, all other land use classes showed a dominant increasing trend, with the rangelands of the region experiencing the greatest expansion. The results of the SWAT model also revealed that the runoff trend in the Mardagh Chay basin has largely corresponded with land use changes during this period. In particular, the growth of pasture and built-up areas in the region has had a direct impact on the increase in runoff in the southern areas. Considering the effect of the topography and slope of the basin on flow trends, as well as the greater imperviousness of land surfaces in the southern areas compared to others, the flood potential in these areas has been determined to be significantly higher.

*Corresponding author: Dr. Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam E-mail address: Rezmogh@tabrizu.ac.ir

How to cite this Article: Rezaei Moghaddam, M. H., Haghighat, A., Rahimpour, T., & Behboody, A. (2025). Assessing the Effects of Land Use Change on Flood Occurrence in the Mordaq Chai Watershed Using the SWAT and Artificial Neural Network Models. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 72-92. <https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.92648.1558>



©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

Floods are considered one of the most important and abundant geomorphic hazards in the country, which cause a lot of damage every year. Recent events in the course of the Mordaq River have indicated the frequency and intensity of floods in the basin. However, the changes in hydrological and climatic regimes of the basin and what causes these changes in the basin have not been well studied. During the last few decades, significant developments have occurred in the Mordaq chai basin with the aim of developing agricultural lands, expanding settlements and other purposes. During this period, several events have been observed in surface flows and river flooding, including the flooding of settlements and the destruction of infrastructure during the rainy season. The present research has evaluated the impact of land use changes on floods in Mordaq chai basin in East Azerbaijan province.

Material and Methods

Mordaq Chai basin is located at latitudes between $37^{\circ} 16'$ and $37^{\circ} 44'$ north, and at longitudes between $46^{\circ} 21'$ and $46^{\circ} 30'$ east. The basin area is about 332 Km². The elevation variations of the basin range from 1567 meters at the outlet of the basin to 3693 meters in Sahand Mountain. In this study land use classification was done using artificial neural network model and land use map was obtained in 2001, 2011 and 2021. Then, the classification results were compared, for which the LCM model was used. The SWAT model has been implemented on the results of land use classification. In addition, the sensitivity assessment of the results has been considered in two phases of calibration and validation, in this regard, land use in 2001 was recalibrated in the statistical period of 1985-1999 and validated in the statistical period of 2000-2001. Also, the land use of 2011 was calibrated in the statistical period of 2002-2009 and validated in the statistical period of 2010-2011 and the land use of 2021 was calibrated in the statistical period of 2012-2019 and validated in the statistical period of 2020-2021.

Results and Discussion

Over the course of twenty years, with the exception of barren lands, other land use classes have shown a predominant upward trend, and the pastures in the region have witnessed the most significant expansion in terms of area. This shift highlights notable changes in land use patterns across the area. The increase in pastureland could be attributed to various factors, such as changes in agricultural practices, conservation policies, or even natural shifts in the ecosystem. This growth in pastures may have positive implications for biodiversity conservation, soil erosion prevention, and overall environmental improvement in the region. However, to fully understand the underlying reasons for these changes and their long-term impacts, a more detailed analysis and further data examination are required. According to the physiography and topography governing the basin, the situation is such that in the northern half of the region, we see more natural land cover (including snow, water, barren and pasture) than in the southern half, where human activities (gardens and built-up lands) dominate. The role of Mordaq Chai river in this field has also been significant and for example, most of the gardens of the region are distributed linearly next to this river and its branches, or the villages of the region that have the largest area of built-up land are located in the vicinity of these rivers. In 2001, wasteland, pastures, and gardens accounted for the largest share of existing land uses at 61.21%, 29.1%, and 8.01%, respectively, and snow, built-up areas, and water were next in rank at 1.59%, 0.073%, and 0.016%, respectively. In 2021, the relative share of barren lands has decreased sharply and reached 28.21% of the entire region, and on the other hand, pastures have grown a lot and their relative share in the region has become 54.45%.

Conclusions

The simulation outcomes generated by the SWAT model revealed certain limitations in its application within the Mordaq Chai basin. Specifically, the calibration and validation phases at the overarching basin scale, which incorporated land use data from varying years, yielded suboptimal and unsatisfactory results. This primary deficiency was quantitatively demonstrated by the fact that the observed runoff data points

frequently fell outside the simulated uncertainty range predicted by the model. The root cause of this discrepancy has been identified as a fundamental inadequacy in the model's algorithmic representation of snowmelt-driven runoff. The SWAT model appears to systematically miscalculate the volume and timing of runoff originating from the melting snowpack, particularly during the critical hydrological period spanning from late winter through late spring. This improper estimation significantly compromises the accuracy of the overall surface runoff simulation, as snowmelt is a major contributor to the basin's hydrologic regime. Furthermore, the analysis of long-term trends established a strong correlation between the hydrological behavior of the basin and anthropogenic changes to the landscape. The recorded trajectory of runoff in the Mordaq Chai basin has been largely congruent with and influenced by the concurrent pattern of land use and land cover change (LULC) over the same period. A direct causal relationship was observed: the expansion of two specific land use classes—pastureland and built-up/urbanized areas—within the southern regions of the watershed has acted as a primary driver for increased runoff generation. This phenomenon is exacerbated by the underlying physiographic characteristics of the basin. The southern areas are distinguished by a more pronounced topography and steeper slopes, which naturally accelerate flow velocity and reduce concentration times. Coupled with this, the land surface in these southern zones has become increasingly impervious due to urbanization and the degradation of natural vegetation cover. This combination of factors—steeper slopes and reduced infiltration capacity—creates a synergistic effect that drastically elevates the flood potential, making these southern areas disproportionately more vulnerable to high-flow events and flooding compared to other parts of the basin.

Acknowledgements

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر روند وقوع سیلاب حوضه آبریز مردق چای با استفاده از مدل SWAT و شبکه عصبی مصنوعی

محمدحسین رضائی مقدم^{۱*}، عاطفه حقیقت^۲، توحید رحیم پور^۳، عبدالله بهبودی^۴

*^۱ استاد ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ کارشناس ارشد ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۳ پژوهشگر پسادکتری ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۴ دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله:	در طی چند دهه اخیر، تحولات محسوسی در گستره حوضه آبریز مردق چای با هدف توسعه زمین‌های زراعی، گسترش سکونت‌گاه‌ها و مقاصد دیگر صورت گرفته است. در این مدت، چندین رویداد مانند جریان‌های سطحی و طغیان رودخانه‌ها رخ داده که منجر به سیلاب در شهرک‌ها و آسیب به زیرساخت‌ها شده است. بر همین اساس، پژوهش حاضر به مطالعه و ارزیابی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر سیلاب در سطح حوضه مردق چای در استان آذربایجان شرقی پرداخته است. ابتدا طبقه‌بندی کاربری اراضی با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی انجام شده و نقشه کاربری اراضی در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ به دست آمده است. در ادامه، مدل SWAT بر روی نتایج طبقه‌بندی کاربری اراضی به اجرا درآمده است. مطابق نتایج، در طی مدت زمان بیست ساله، به استثنای اراضی بایر، دیگر طبقات کاربری اراضی دارای روند غالب افزایشی بوده‌اند که مراتع منطقه با بیشترین رشد وسعت مواجه شده است. نتایج مدل SWAT نیز حاکی از این بوده که روند رواناب در سطح حوضه مردق چای تا حد زیادی با روند تغییرات کاربری اراضی منطقه در طی این مدت هم‌سو بوده است و رشد گستره اراضی مرتعی و ساخته شده در سطح منطقه تأثیر کاملاً مستقیمی بر افزایش رواناب در این نواحی جنوبی گذاشته است و با توجه به تأثیر توپوگرافی و شیب حوضه بر روند جریان و نفوذناپذیرتر بودن سطح زمین در نواحی جنوبی نسبت به سایر نواحی، پتانسیل سیل‌خیزی در این نواحی بسیار بالاتر از سایر مناطق تشخیص داده شده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۴	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۲	
کلمات کلیدی:	
تغییرات کاربری اراضی	
ارزیابی ریسک سیلاب	
مدل‌سازی هیدرولوژیکی	
مدیریت حوضه آبریز	
مدل SWAT	

مقدمه

امروزه رشد سریع جمعیت، شهرنشینی روزافزون و توسعه اقتصادی منجر به افزایش تقاضا برای آب، انرژی و غذا گردیده و فشار مضاعفی بر زمین و منابع آب در سراسر جهان وارد نموده است. به دنبال این وضعیت، در حال حاضر بسیاری از مناطق در سراسر جهان و به ویژه در کشورهای در حال توسعه، دستخوش تغییرات قابل توجه در کاربری یا پوشش زمین شده‌اند (Khoi, Loi, & Sam, 2021). یکی از پیامدهای مهم تغییرات کاربری اراضی تشدید وقوع سیلاب‌های مخرب است. سیلاب‌ها از مهم‌ترین و فراوان‌ترین مخاطرات در کشور محسوب می‌شوند که همه ساله خسارت‌های زیادی را بر جای می‌گذارند (Rezaei Moghaddam & Rahimpour, 2024). از دیدگاه زمین‌شناختی، سیل‌ها پیامد طبیعی جریان آب در یک محیط دائماً در حال تغییر هستند. بارندگی‌های شدید، تغییر کاربری زمین از جمله جنگل‌زدایی در بالادست حوضه و اقدامات مهندسی مختلف در مسیر رودخانه، همگی به بزرگی و فراوانی حوادث سیل کمک نموده است (Tali, 2011). تغییرات غیر یکنواخت کاربری اراضی موجب برهم خوردن چرخه آب از تعادل طبیعی می‌شود که پیامدهای ناشی از سیل‌های ویرانگر اعم از خسارات اقتصادی، تلفات جانی، هدررفت آب و نتیجتاً کاهش منابع آب در دسترس را به دنبال داشته است (Yari, Soltani-Gerdefaramarzi, & Ghasemi, 2019). تغییر کاربری زمین یک ویژگی مهم در فرآیند رواناب است که بر نفوذ، فرسایش، تبخیر و تعرق تأثیر می‌گذارد. تغییرات کاربری اراضی منجر به تغییراتی در ویژگی‌های بارندگی و رواناب یک حوضه می‌شود که متعاقباً بر رژیم‌های هیدرولوژیکی و رسوبی حوضه، تأثیر می‌گذارد (Choto & Fetene, 2019). به دلیل توسعه سریع، پوشش اراضی دستخوش تغییراتی می‌شود که باعث می‌شود بسیاری از خاک‌ها به سطوح غیرقابل نفوذ^۱ تبدیل شوند که منجر به کاهش سرعت نفوذ خاک و در نتیجه افزایش مقدار و سرعت رواناب می‌شود (Tali, 2011). تبدیل تالاب‌ها به مناطق شهری، منجر به توسعه سطوح نفوذ ناپذیر از قبیل خانه‌ها، معابر و بزرگراه‌ها گردیده و امکان نفوذ را به آب نمی‌دهد، بنابراین تمام آبی که روی آن‌ها می‌ریزد به رواناب تبدیل شده و در نتیجه بر چرخه آب منطقه‌ای تأثیر می‌گذارد (Achugbu et al., 2022).

مطالعه حوضه‌های آبریز برای ارزیابی تأثیر تغییر کاربری زمین بر وقوع سیل سابقه طولانی داشته و موضوعات سیل و تغییر کاربری اراضی در موارد متعددی در مناطق مختلف جهان مورد توجه قرار گرفته است. رحمتی و همکاران (Rahmati, Rezaei Moghaddam & Nikjoo, 2021) تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر فرسایش و سیل‌خیزی حوضه سقزچای استان کردستان را در دوره قبل و بعد از احداث سد شهید کاظمی با استفاده از مدل ArcSWAT تجزیه و تحلیل و ارزیابی نموده‌اند. پس از انجام شبیه‌سازی‌ها، ضریب صحت‌سنجی و واسنجی رسوب راندمان نش - ساتکلیف برابر با ۰/۷۶ و ۰/۶۸ به دست آمده است که بر این اساس حوضه سیل‌خیز بوده است. علاوه بر این، اراضی کشاورزی و مراتع متراکم به ترتیب ۲/۱۳۴ و ۱۷/۱۹۵ هکتار کاهش و اراضی بایر و ساخته‌شده به ترتیب ۱۶/۴۶ و ۲/۰۷۲۲ هکتار افزایش مساحت داشته‌اند. در مطالعه‌ای به وسیله حلیم و همکاران (Haleem et al., 2022) اثرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم و کاربری زمین بر تغییرات رژیم جریان در بالادست حوضه سند در پاکستان تجزیه و تحلیل شده است. در این مطالعه، از مدل SWAT استفاده شده است و همچنین سناریوهای آینده کاربری زمین و تغییرات آب و هوایی به ترتیب با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی اتوماتای سلولی و چهار مدل گردش عمومی تصحیح شده پیش‌بینی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی شده نشان داد که مدل SWAT به خوبی عمل می‌کند. نتایج به‌دست آمده از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ نشان داده است که تغییر اقلیم (۶۱/۶۱ درصد) تأثیر بیشتری بر رواناب رودخانه‌ها

1- Impervious

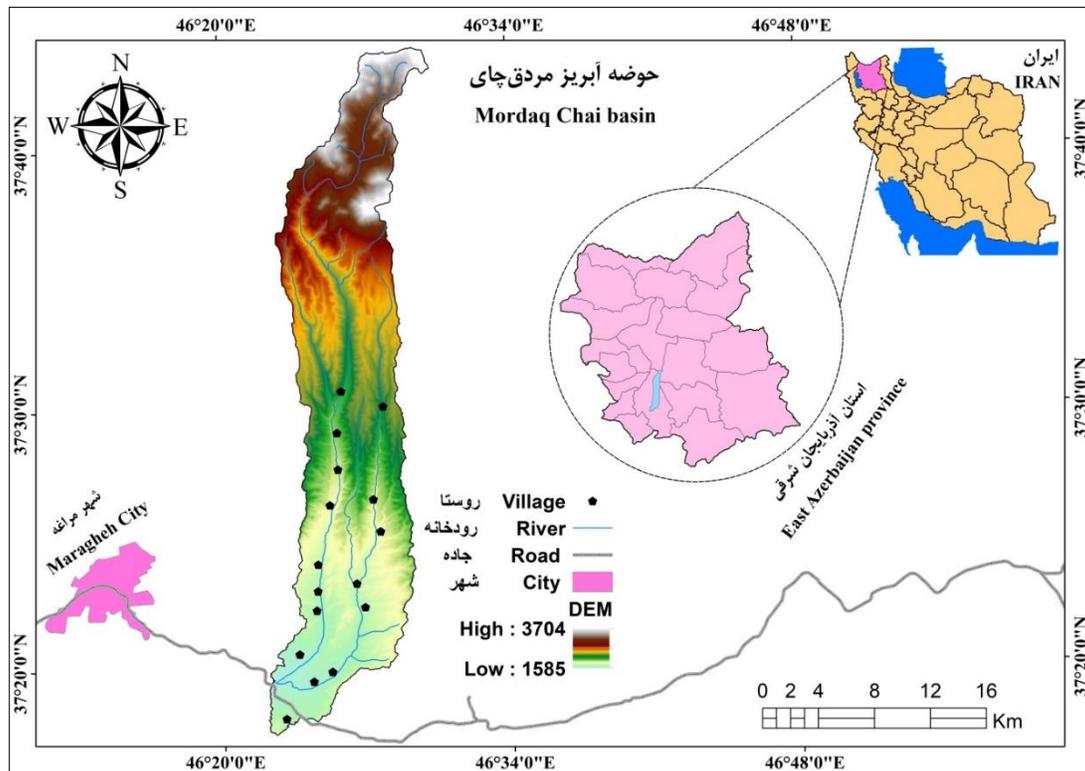
نسبت به تغییر کاربری زمین (۳۸/۳۹ درصد) دارد. بنابراین، پیش‌بینی شده که تغییرات آب و هوایی و کاربری زمین باعث افزایش عمق رواناب آینده در این حوضه شود که تأثیر تغییر اقلیم بیشتر خواهد بود. در تحقیقی سوگیانتو و همکاران (Sugianto, Deli, Miswar, Rusdi & Irham, 2022) به مطالعه تأثیر تغییر کاربری و پوشش زمین بر وقوع سیلاب در حوضه تونوم، آچه جایا واقع در جزیره سوماترا در کشور اندونزی پرداخته شده است. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده افزایش قابل توجهی در استفاده از زمین‌های مسکونی، زمین‌های باز، مزارع برنج و تالاب‌ها (آب‌ها) و نرخ‌های نفوذ مختلف در دوره زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۹ بوده است که به تنوع خطرات منطقه سیل کمک می‌کند. از نظر خطرپذیری سیل، این حوضه دارای ریسک بالا و بسیار زیاد (۱۱/۹۸ درصد)، خطر متوسط (۵۶/۲۴ درصد) و ریسک کم و بسیار کم (۳۱/۷۹ درصد) می‌باشد. مارو و همکاران (Maru, Hailelassie, Zeleke, & Teferi, 2023) در پژوهش خود به تجزیه و تحلیل اثرات تغییر پوشش و کاربری زمین بر رواناب و دسترسی به آب سطحی در حوضه آواش در کشور اتیوپی اقدام نموده‌اند. در این پژوهش از مدل SWAT و تعادل اقلیمی آب (CWB) بهره گرفته شده است. نتایج پژوهش حاکی از آن بوده است که از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۶، مساحت زمین‌های ساخته‌شده و بایر به ترتیب ۵/۳ درصد و ۳/۴ درصد افزایش یافته است. همچنین بر اساس جریان روزانه کالیبره شده، رواناب در سناریوهای ۱۹۹۳ و ۲۰۱۶ به ترتیب ۲۳۶/۰۱ میلی‌متر و ۲۷۲/۵۹ میلی‌متر برآورد گردیده است. علاوه بر این، کل رواناب حوضه برای سناریوهای کاربری زمین در سال ۱۹۹۳ و ۲۰۱۶ به ترتیب ۳۶۶/۷ میلی‌متر و ۳۸۲/۰۱ میلی‌متر بوده است. شاخص CWB فصلی حوضه نیز روند کاهشی را نشان داده است.

امروزه وضعیت کاربری و پوشش زمین به شدت در حال تغییر است، به‌ویژه در مناطقی که اقتصاد آن‌ها عمدتاً مبتنی بر کشاورزی است. در طی چند دهه اخیر، تحولات محسوسی در گستره حوضه آبریز مردق‌چای با هدف توسعه زمین‌های زراعی، گسترش سکونتگاه‌ها و مقاصد دیگر صورت گرفته است. در طی این مدت چندین رویداد در جریانات سطحی و طغیان رودخانه‌ها از جمله سیلابی شدن شهرک‌ها و تخریب زیرساخت‌ها در طول فصل بارندگی مشاهده گردیده است. از طرفی دیگر، کاهش قابل توجه جریان آبراهه در فصل خشک نیز در حوضه آبریز رودخانه مردق‌چای اتفاق افتاده است. تحولات اخیر در جریان رودخانه مردق، حاکی از فراوانی و شدت وقوع سیل در سطح حوضه، بوده است. با این حال، تغییرات رژیم‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی حوضه و این که چه چیزی باعث این تغییرات در حوضه می‌شود، به‌خوبی مورد مطالعه قرار نگرفته است. بر همین اساس، پژوهش حاضر بر آن است که به مطالعه و ارزیابی تغییرات کاربری اراضی در سطح حوضه مردق‌چای در استان آذربایجان شرقی پرداخته و تأثیر بالقوه این تغییرات بر روند سیلاب در آن را تجزیه و تحلیل نماید.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز مردق‌چای در مختصات جغرافیایی $37^{\circ} 16' 32''$ تا $37^{\circ} 44' 02''$ درجه عرض شمالی و $46^{\circ} 21' 01''$ تا $46^{\circ} 30' 25''$ درجه طول شرقی گسترده شده است (شکل ۱). مساحت حوضه، بالغ بر ۳۳۲/۹ کیلومتر مربع می‌باشد. از نظر مقادیر ارتفاعی، حداکثر ارتفاع حوضه ۳۷۰۴ متر و حداقل ارتفاع آن ۱۵۸۵ متر از سطح دریاهای آزاد است. مردق‌چای یک حوضه کاملاً کوهستانی است. روند ارتفاعی در این حوضه به‌گونه‌ای است که از شمال به جنوب از ارتفاع آن کاسته می‌شود. از نظر موقعیت نسبی، حوضه مردق‌چای در دامنه جنوبی کوه سهند واقع شده و از سمت شمال به حوضه رودخانه ليقوان‌چای، از سمت جنوب به حوضه رودخانه لیلان‌چای، از سمت شرقی به حوضه رودخانه قرنقو و از سمت غربی به رودخانه صوفی‌چای و چکان‌چای محدود می‌شود. رودخانه مردق‌چای از ذوب برف‌ها و یا چشمه‌های موجود در دامنه جنوبی کوه سهند سرچشمه گرفته و به طرف جنوب جریان می‌یابد که در ادامه این مسیر، رودخانه مغانجیق‌چای نیز به آن می‌پیوندد.

حجم آب سالیانه رودخانه مردق‌چای در حدود ۱۰۷ میلیون مترمکعب است اما از طرفی یک رودخانه تقریباً فصلی محسوب می‌شود که اغلب در تابستان خشک می‌شود. بر اساس محاسبات گرادیان درجه حرارت در ایستگاه سینوپتیک مراغه، میانگین درجه حرارت سالانه در حوضه مردق‌چای ۵/۵ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه در این حوضه ۵۳۵/۶ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. مردق‌چای یکی از سرشاخه‌های دریاچه ارومیه است و مشتمل بر دامنه‌های ارتفاعات جنوبی کوه سهند و چشمه‌های روان مشرف به مسیر رودخانه فصلی مردق‌چای می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه مردق‌چای

Fig.1. Geographical location of the Mordaq chai basin

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر یکی از تحقیقات کاربردی با روش توصیفی - تحلیلی است که به منظور ارزیابی و بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر روند سیلاب در حوضه آبریز مردق‌چای استان آذربایجان شرقی به انجام رسیده است. در تحقیق حاضر از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵، ۷ و ۸، داده‌های توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، داده‌های خاک (مستخرج از نقشه جهانی فائو با قدرت تفکیک ۵۰۰ متر) و مدل رقمی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر به منظور انجام تجزیه و تحلیل‌های فضایی و زمانی در بستر ArcGIS بهره گرفته شده است. در ادامه سه روش مختلف برای تجزیه و تحلیل داده‌ها مورد استفاده واقع شده است: ۱- شبکه عصبی مصنوعی، ۲- مدل SWAT، ۳- مدل LCM.

مدل شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی یک مدل پردازش داده، است که مبتنی بر نحوه پردازش داده‌ها توسط سیستم‌های عصبی بیولوژیکی همچون مغز است (Dastres & Soori, 2021). به طور کلی، شبکه عصبی مصنوعی گروهی، متصل از گره‌هایی است که با استفاده از مبانی ریاضی به پردازش اطلاعات می‌پردازند. این رویکرد با ساختاری نوروئی^۱ و هوشمندانه از طریق الگوبرداری بهینه از نوروئ‌های موجود در مغز انسان تلاش می‌کند که رفتار درون سلولی نوروئ‌های مغزی را از طریق توابع تعریف شده ریاضی شبیه‌سازی کند و از طریق وزن‌های محاسباتی موجود در خطوط ارتباطی نوروئ‌های مصنوعی، عملکرد سیناپسی^۲ را در نوروئ‌های طبیعی مدل‌سازی نماید (Bakhtiyari, Komeh & Memarian, 2018). انواعی از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی برای طبقه‌بندی کاربری و پوشش زمین وجود دارد. شبکه عصبی پرسپترون چندلایه^۳ (MLP) متداول‌ترین روش در این زمینه است که برای طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دور مورد استفاده قرار گرفته و عملکرد انتقالی مغز انسان را شبیه‌سازی می‌کند. پرسپترون چند لایه یک کلاس کاملاً متصل از شبکه عصبی مصنوعی پیش‌خور^۴ است. شبکه عصبی پرسپترون چندلایه به ترتیب شامل یک لایه ورودی، یک یا چند لایه مخفی^۵ و یک لایه خروجی است و تابع آستانه^۶ به تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نوروئ‌های موجود در هر لایه پنهان و همچنین نوع تابع فعالیت به کار رفته در هر نوروئ می‌تواند تغییر نماید (Shirani, Heydari & Arabameri, 2017).

مدل SWAT

ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) به‌منظور پیش‌بینی اثرات اقدامات مدیریت زمین بر منابع آب و محصولات کشاورزی در حوضه‌های مختلف با خصوصیات خاک، کاربری اراضی و بهره‌برداری متفاوت در بستر زمان توسعه داده شده است (Neitsch, Arnold, Kiniry, Williams & King, 2005). نقشه‌های اصلی مورد نیاز این مدل، شامل مدل رقومی ارتفاعی حوضه، نقشه‌های خاک‌شناسی، نقشه‌های کاربری اراضی و پوشش گیاهی منطقه و داده‌های اقلیمی است که باید در قالب رستری به مدل ارائه شوند. سایر اطلاعات مربوط به داده‌های جامع هواشناسی، کیفیت آب، مخازن، عوامل مؤثر بر جریان سطحی و کانال، آب زیرزمینی، برداشت آب، مدیریت اراضی و برخی زمینه‌های دیگر با توجه به هدف ارزیابی باید در مدل وارد شوند. رابطه اصلی در محاسبه تمام پارامترهای آب حوضه در این مدل به شرح رابطه (۱) است (Arnold et al., 2012).

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

که در این رابطه، SW_t مقدار نهایی آب موجود در خاک (میلی‌متر)، SW_o مقدار اولیه آب موجود در خاک (میلی‌متر)، t زمان بر حسب روز، R_{day} مقدار بارش در روز i (میلی‌متر)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز i (میلی‌متر)، E_a مقدار تبخیر و تفرق در روز i (میلی‌متر)، W_{seep} مقدار آب نفوذی به لایه فوقانی خاک در روز i (میلی‌متر) و Q_{gw} مقدار آب زیرزمینی برداشت شده در روز i (میلی‌متر) می‌باشد.

- 1-Neuron
- 2-Synaptic
- 3-Multilayer perceptron
- 4-Feedforward
- 5- Hidden
- 6-Threshold

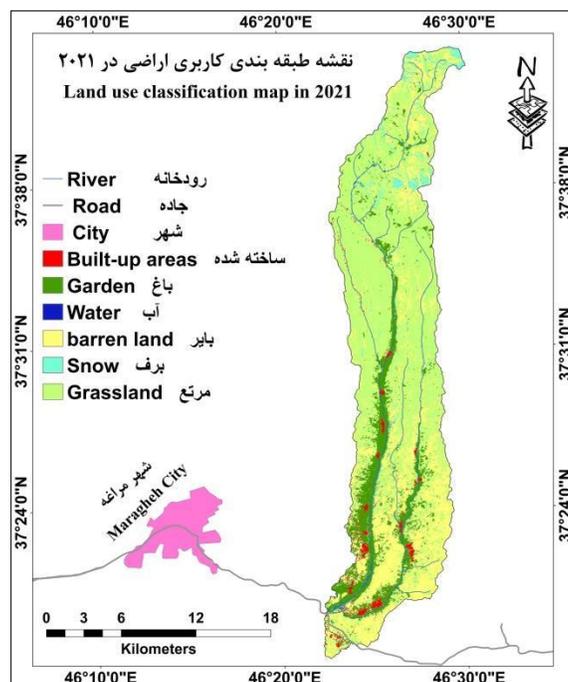
در گام نخست، داده‌های ورودی مورد نیاز شامل مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت ۳۰ متر، نقشه کاربری اراضی برای دو مقطع زمانی (به‌عنوان سناریو)، نقشه خاک‌شناسی و داده‌های هواشناسی روزانه (شامل بارندگی، دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و سرعت باد) جمع‌آوری گردید. داده‌های دبی روزانه از ایستگاه هیدرومتری خروجی حوضه نیز به‌منظور کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل تهیه شد. داده‌های مکانی در محیط نرم‌افزار ArcGIS و افزونه ArcSWAT پردازش و وارد مدل شدند. با استفاده از DEM، مرز حوضه و شبکه زهکشی استخراج و حوضه به چندین زیرحوضه تقسیم شد. در ادامه، ترکیب نقشه‌های کاربری اراضی، نوع خاک و شیب برای تولید واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (Hydrologic Response Units - HRUs) مورد استفاده قرار گرفت. این HRUsها امکان تحلیل دقیق‌تری از رفتار هیدرولوژیکی در بخش‌های مختلف حوضه را فراهم می‌کنند (Ghazavi & Fazeli, 2019). شبیه‌سازی رواناب سطحی در مدل SWAT بر پایه معادله شماره منحنی خدمات حفاظت خاک آمریکا (SCS-CN) انجام می‌شود. سایر فرآیندهای مرتبط با چرخه هیدرولوژیکی از جمله تبخیر و تعرق بالقوه به روش Penman-Monteith، نفوذ، جریان سطحی، نفوذ عمقی و جریان پایه نیز به‌صورت روزانه مدل‌سازی گردید. مدل با استفاده از داده‌های کاربری اراضی پایه اجرا شده و نتایج اولیه استخراج شد. برای بهینه‌سازی نتایج، فرآیند کالیبراسیون مدل با بهره‌گیری از نرم‌افزار SWAT-CUP و الگوریتم SUFI-2 انجام گرفت. در این مرحله، پارامترهای حساس مدل از طریق مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مشاهده‌ای دبی تنظیم شدند. عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌های آماری مانند ضریب ناش - ساتکلیف (NSE)، ضریب تبیین (R^2) و درصد بایاس (PBIAS) ارزیابی شد. پس از حصول نتایج رضایت‌بخش در دوره کالیبراسیون، مدل برای یک دوره مستقل دیگر اعتبارسنجی گردید. در گام نهایی، سناریوی تغییر کاربری اراضی اعمال و مدل مجدداً اجرا شد تا اثرات این تغییرات بر میزان رواناب و دبی سیلابی تحلیل گردد.

مدل‌سازی تغییرات کاربری (LCM¹)

مدل LCM، یک ابزار نرم‌افزاری ابتکاری برای برنامه‌ریزی زمین و پشتیبانی تصمیم‌گیری است که توسط ایستمن (۲۰۰۶) طراحی شده است که پیچیدگی‌های تجزیه و تحلیل تغییرات، مدیریت منابع و ارزیابی زیستگاه را ساده‌تر می‌کند (Eastman & Toledano, 2018). با استفاده از مدل‌سازی تغییر پوشش زمین در نرم‌افزار IDRISI TerrSet، می‌توان اطلاعات و داده‌های مربوط به پوشش تاریخی زمین را برای ارزیابی، مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات پوشش، مورد آنالیز قرارداد که شامل مراحل تجزیه و تحلیل و آشکارسازی تغییرات، مدل‌سازی احتمال انتقال، پیش‌بینی و مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی و ارزیابی صحت مدل‌سازی است (Salarin, Tatian, Ghanghermeh & Tamartash, 2022).

نتایج و بحث

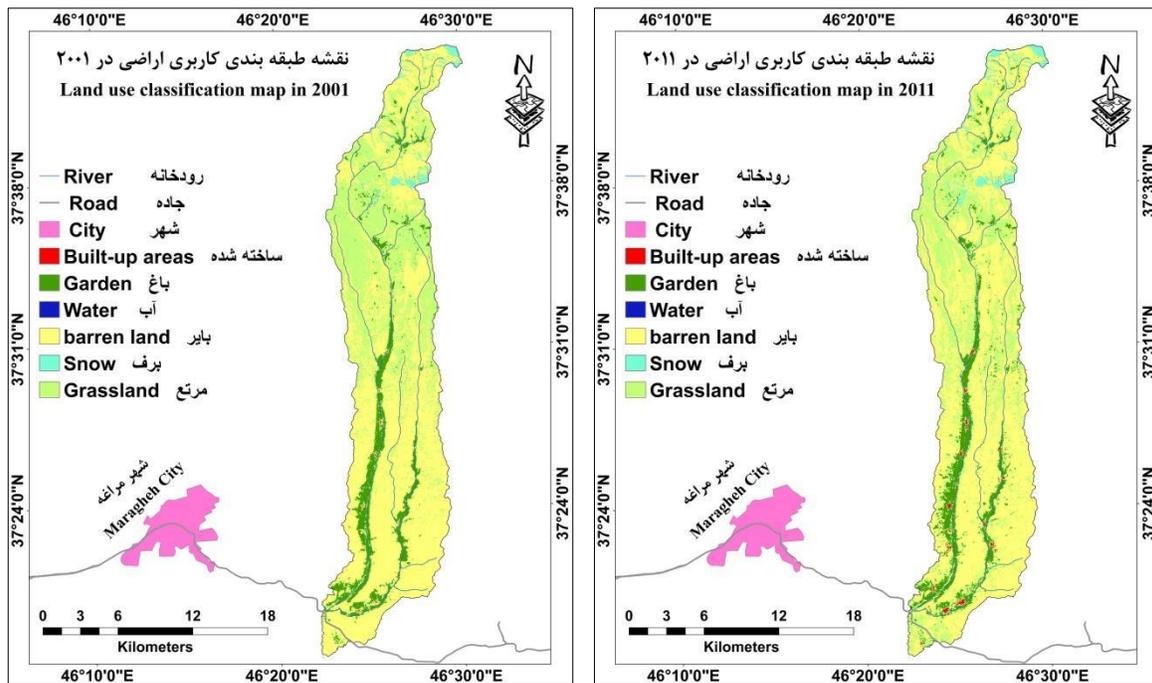
طبقه‌بندی کاربری اراضی منطقه در طی یک دوره بلند زمانی بیست ساله و در سه سال ۲۰۰۱، ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ به انجام رسیده است تا گستره طبقات کاربری اراضی در نواحی مختلف حوضه در طی این سه سال مشخص شده و در فاز بعدی امکان مقایسه آن‌ها با یکدیگر فراهم شود. با توجه به فیزیوگرافی و توپوگرافی حاکم بر حوضه، وضعیت به گونه‌ای است که در نیمه شمالی منطقه بیشتر شاهد پوشش طبیعی زمین (اعم از برف، آب، بایر و مرتع) نسبت به نیمه جنوبی آن، که فعالیت‌های انسانی (باغات و اراضی ساخته‌شده) در آن غالب است، می‌باشیم. نقش رودخانه مردق‌چای در این زمینه نیز قابل توجه بوده است و برای مثال، اغلب باغات منطقه به صورت خطی در جوار این رود و شاخه‌های آن توزیع یافته‌اند و یا روستاهای منطقه که بیشترین وسعت اراضی ساخته‌شده را به خود اختصاص داده‌اند در همجواری با این رودخانه مستقر شده‌اند.



شکل ۲- نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی منطقه در سال ۲۰۲۱

Fig.2. Land use classification map of the study area in 2021

با توجه به نتایج طبقه‌بندی کاربری اراضی منطقه بر اساس مدل شبکه عصبی مصنوعی که در جدول ۱ نشان داده شده است، در سال ۲۰۰۱ اراضی بایر، مراتع و باغات به ترتیب با ۶۱/۲۱٪، ۲۹/۱٪ و ۸/۰۱٪ بیشترین سهم از کاربری‌های موجود را در بر گرفته‌اند و برف، اراضی ساخته‌شده و آب‌ها نیز به ترتیب با ۱/۵۹٪، ۰/۰۷۳٪ و ۰/۰۱۶٪ در رده‌های بعدی از این نظر جای گرفته‌اند. در طبقه‌بندی سال ۲۰۱۱ نیز همین ترتیب برقرار بوده است تنها با این تفاوت که سهم نسبی مراتع و آب‌ها در کاربری اراضی منطقه کاهش یافته است، در حالی که سایر کاربری‌ها سهم خود را افزایش داده‌اند. همچنین در سال ۲۰۲۱، سهم نسبی اراضی بایر به شدت کاهش یافته و به ۲۸/۲۱٪ از کل منطقه رسیده است و در مقابل، مراتع رشد بسیار زیادی داشته و سهم نسبی آن‌ها در منطقه ۵۴/۴۵٪ شده است که ناشی از جابه‌جایی مستقیم میان این دو کلاس می‌باشد. در این سال سهم باغات، برف، اراضی ساخته‌شده و آب‌ها به ترتیب برابر با ۱۱/۷۶٪، ۳/۱۲٪، ۱/۹۶٪ و ۰/۴۹٪ بوده است. بر اساس طبقه‌بندی‌های صورت‌گرفته، باغات و اراضی ساخته‌شده در طی این مدت همواره روند افزایشی داشته‌اند. از طرفی دیگر، آب‌ها، اراضی بایر و مراتع روند متناوب ده ساله را نمایان ساخته‌اند.



شکل ۳- نقشه طبقه بندی کاربری اراضی منطقه در سال ۲۰۱۱ و ۲۰۰۱
 Fig.3. Land use classification map of the study area in 2001 and 2011

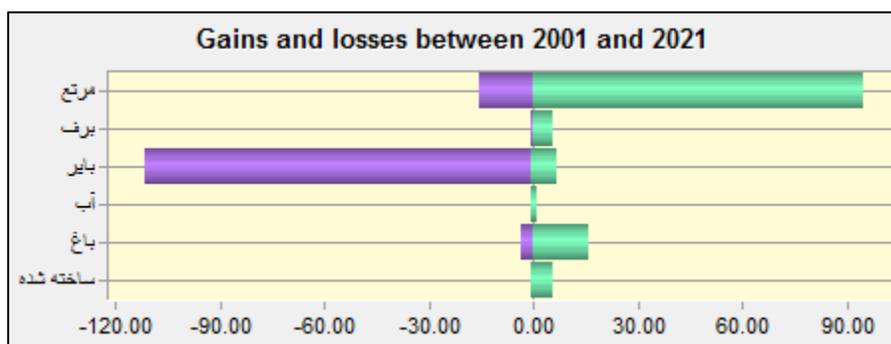
جدول ۱- نتایج طبقه بندی کاربری اراضی با مدل شبکه عصبی مصنوعی

Table 1- Results of land use classification with artificial neural network model

2021		2011		2001		سال
درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	طبقات کاربری
Percent	(Km ²)	Percent	(Km ²)	Percent	(Km ²) Area	land use classification
1.96	6.254	0.43	1.38	0.073	0.235	ساخته شده Built-up areas
11.76	37.54	8.59	27.41	8.01	25.56	باغات Garden
0.49	1.57	0.0006	0.002	0.016	0.052	آب Water
28.21	90.022	61.97	197.74	61.21	195.321	بایر barren land
3.12	9.96	2.21	7.065	1.59	5.058	برف Snow
54.45	173.74	26.79	85.5	29.1	92.86	مراتع Grassland
100	319.09	100	319.09	100	319.09	مجموع sum

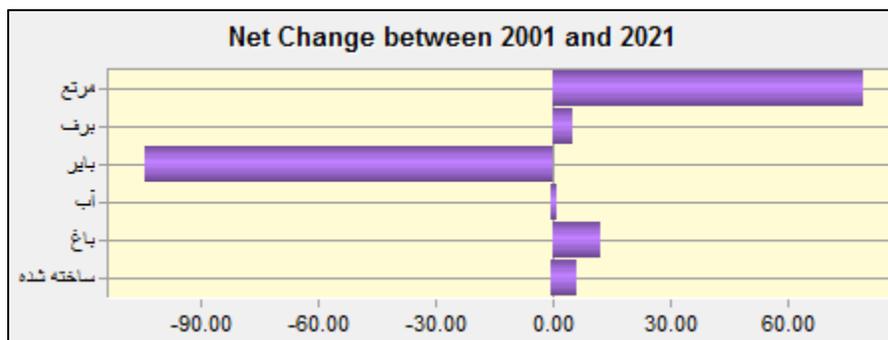
تحلیل مکانی - زمانی کاربری اراضی فرآیند شناسایی تغییرات در وضعیت بهره‌برداری از زمین در مناطق مختلف در طول زمان است. زمانی که داده‌ها دارای ابعاد زمانی و مکانی معینی می‌شوند، در تجزیه و تحلیل داده‌ها از رویکرد ارزیابی زمانی - فضایی استفاده می‌شود. از این نظر، کاربری اراضی و تغییرات آن در دو بعد زمانی و فضایی در سطح منطقه قابل بررسی است. همان‌طور که بدان اشاره گردید، به منظور مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی در سطح حوضه مردق‌چای از مدل LCM موجود در محیط تحلیلی IDRISI بهره گرفته شده است تا کم و کیف تغییرات رخ داده در طی دوره آماری مورد مطالعه، شناسایی شود تا با شناخت روندهای موجود بتوان ارزیابی دقیقی از تأثیر تغییرات صورت گرفته بر رواناب حوضه به انجام رساند. در این راستا، تغییرات صورت گرفته در سه بخش قابل ارزیابی است: اول حجم خالص تغییر و تحولات طبقات کاربری اراضی در سطح منطقه به لحاظ افزایشی یا کاهش‌ی بودن آنها است که بر اساس آن می‌توان مساحت طبقات در ابتدا و انتهای دوره بیست ساله را تجزیه و تحلیل نمود. دوم شناسایی مناطقی از حوضه که تغییرات کاربری اراضی در آن رخ داده است و مساحت طبقات کاربری در آن مناطق با افزایش یا کاهش همراه بوده است. سومین مرحله، شناسایی مناطقی از حوضه رودخانه مردق‌چای به لحاظ عدم تغییر و تحولات کاربری اراضی می‌باشد. به عبارتی تشخیص این موضوع که در کدام مناطق، کاربری اراضی در طی مدت زمان بیست ساله بدون تغییر بوده است.

در شکل ۴، نمودار روند تغییرات طبقات کاربری اراضی در منطقه از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ نشان داده شده است. مطابق نمودار حاصله، در طی این مدت زمان بیست ساله، به استثنای اراضی بایر که اغلب با کاهش وسعت همراه شده است، دیگر طبقات کاربری اراضی دارای روند غالب افزایشی بوده‌اند که مراتع منطقه بیش از سایر اراضی با رشد وسعت مواجه شده است. از این نظر و به لحاظ حجم خالص تغییرات کاربری اراضی که در شکل ۵، نشان داده شده است، ۱۰۴/۱۹ کیلومتر مربع از مساحت اراضی بایر کاسته شده است. در مقابل، ۷۹/۱۰ کیلومتر مربع به مساحت مراتع، ۱۲/۱۰ کیلومتر مربع به باغات، ۱/۵۸ کیلومتر مربع به آب‌ها و ۶/۲۶ کیلومتر مربع به اراضی ساخته‌شده منطقه اضافه شده است. بنابراین و بر اساس مقادیر مذکور، اراضی بایر و مراتع بیشترین تغییر و تحولات را در سطح منطقه نشان داده‌اند که از این نظر مراتع بیشترین افزایش و اراضی بایر بیشترین کاهش را به خود اختصاص داده‌اند که این امر در درجه اول با فاکتورهای اقلیمی مختلف از قبیل بارش، درجه حرارت، رطوبت و پوشش گیاهی و در وهله بعدی با رشد فعالیت‌های زراعی و به‌ویژه زراعت دیم قابل توجیه می‌باشد.



شکل ۴- روند تغییر و تحولات کاربری اراضی منطقه در دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۱ (کیلومتر مربع)

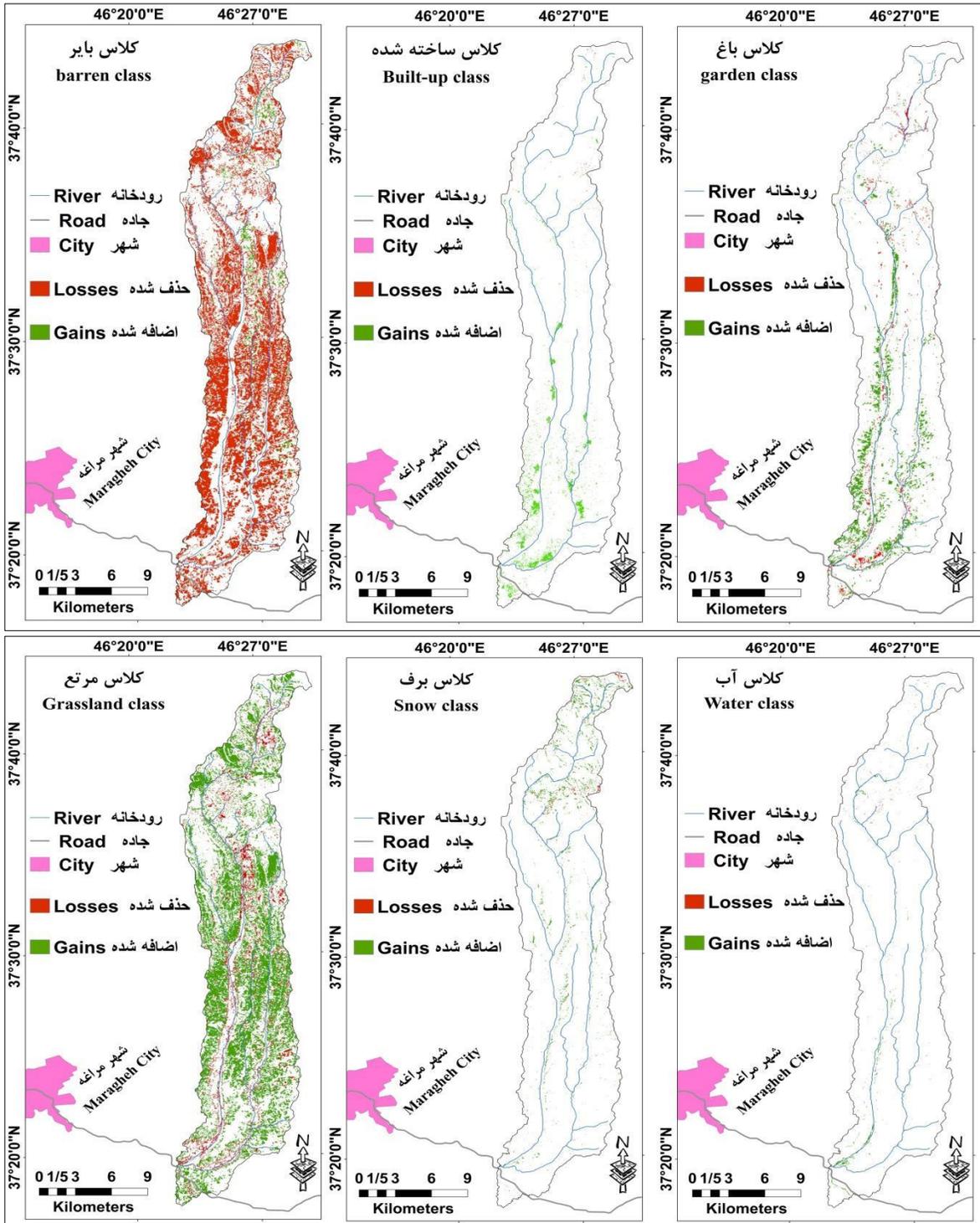
Fig.4. The trend of land use changes in the study area in the period of 2001-2021 (Km²)



شکل ۵- میزان خالص تغییرات کاربری اراضی منطقه در دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۱ (کیلومتر مربع)

Fig.5. The net amount of land use changes in the study area in the period of 2001-2021 (Km²)

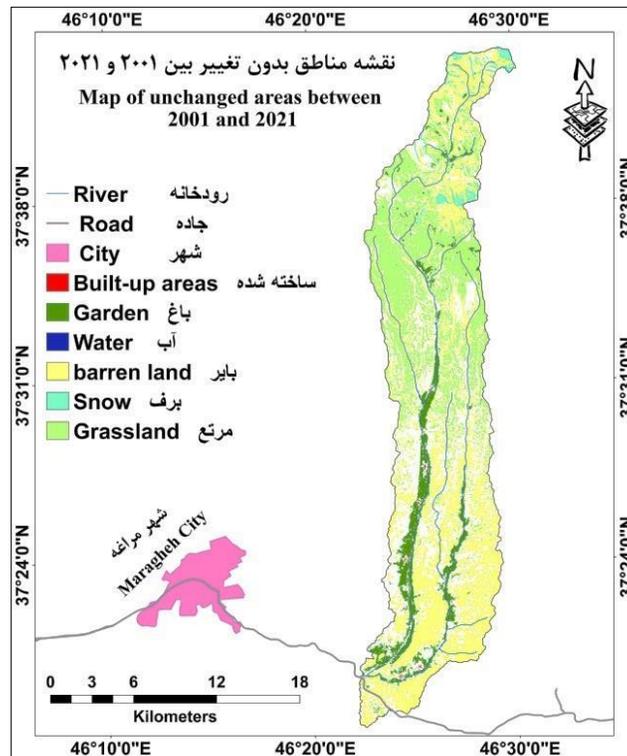
در شکل ۶، نقشه تغییرات فضایی کاربری اراضی حوضه مردق‌چای در طی دوره بیست ساله نشان داده شده است. با توجه به مقایسه کاربری بین دو سال ۲۰۰۱ و ۲۰۲۱، تغییرات قابل توجه کاربری اراضی منطقه کاملاً مشهود می‌باشد. در این راستا و از نظر فضایی، دو کاربری مرتع و بایر در تمام نواحی حوضه با تغییر افزایشی یا کاهشی همراه شده‌اند. بر این اساس، در نواحی پراکنده‌ای در مرکز تا شمال حوضه روند غالب تغییر اراضی بایر از نوع افزایشی و روند غالب تغییر مراتع از نوع کاهشی بوده است و در سایر نواحی عموماً عکس این روند مشاهده شده است و به طور کلی باید گفت که پوشش مرتعی در اغلب موارد جایگزین اراضی بایر و زمین لخت شده است. برای کاربری برف، نقاط شمالی حوضه با توجه به ارتفاع بالا و وجود برف در اکثر مواقع سال، شاهد بیشترین تغییرات می‌باشیم که عمدتاً افزایشی بوده است. برای کاربری‌های ساخته شده، با توجه به اینکه اکثریت نواحی مسکونی و روستایی در نیمه جنوبی منطقه مستقر هستند، بیشترین تغییر در این کاربری‌ها در این ناحیه رخ داده است. کاربری باغات به استثنای نواحی شمال و جنوب حوضه که مساحت از دست داده است، در سایر نواحی اغلب با رشد مساحت همراه شده است. نهایتاً کاربری آب در سطح منطقه به صورت بسیار پراکنده تغییر داشته است و غالب این تغییرات در سمت خروجی حوضه در جنوب و از نوع افزایشی بوده است.



شکل ۶- نقشه تغییرات فضایی کاربری اراضی منطقه در دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۱

Fig.6. Map of the spatial changes of land use in the study area in the period of 2001-2021

به طور کلی، تغییرات فضایی کاربری اراضی منطقه در طی دوره بیست ساله بدین صورت می‌باشد که در مرکز تا نیمه جنوبی حوضه در مقایسه با سایر نواحی تغییرات صورت گرفته بارزتر بوده و در مقابل، بخش‌های زیادی از شمال حوضه و نیز مسیر آبراهه اصلی رودخانه جزو نواحی بدون تغییرات کاربری منطقه محسوب می‌شوند که در نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی سال ۲۰۲۱ عیناً نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۰۱ برچسب‌گذاری شده‌اند. در شکل ۷، نقشه مناطق بدون تغییر کاربری در طی دوره زمانی مورد مطالعه، نشان داده شده است.

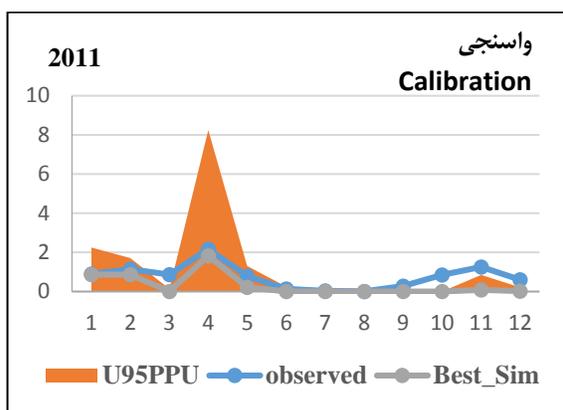


شکل ۷- نقشه نواحی بدون تغییر کاربری اراضی منطقه در دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۱

Fig.7. Map of areas without land use change in the period of 2001-2021

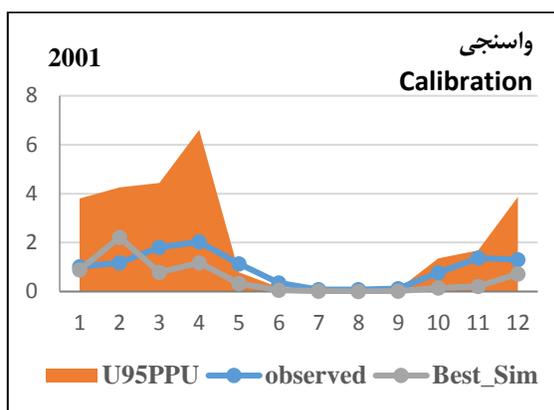
مدل SWAT در چند مرحله به انجام رسیده است. ابتدا تمامی پارامترهای مؤثر بر رواناب حوضه، انتخاب و از میان آن‌ها پارامترهای غیرمؤثر از روند ارزیابی حذف گردیده است. با توجه به این که انتخاب مقادیر مختلف برای واسنجی و بهینه سازی پارامترها محدود بوده و نیز روشی زمان‌بر و پر هزینه است، مدل سازی معکوس به عنوان یکی از روش‌های متداول برای واسنجی مدل در نظر گرفته شده است. در این زمینه الگوریتم SUFI-2 که معکوس مدل سوات بوده و به منظور واسنجی و ارزیابی عدم قطعیت آن استفاده می‌شود، به کار گرفته شده است. الگوریتم مذکور در محیط نرم‌افزاری SWAT-CUP به اجرا درآمده است. در این نرم‌افزار کلیه مراحل آزمون و خطا توسط مدل به انجام رسیده و کاربر صرفاً باید محدوده منطقی پارامترهای مؤثر بر واسنجی را به مدل معرفی کند. در این مطالعه، کاربری اراضی سال ۲۰۰۱ در دوره آماری ۱۹۹۹-۱۹۸۵ واسنجی و در دوره آماری ۲۰۰۰-۲۰۰۱ اعتبارسنجی شده است.

همچنین، کاربری اراضی سال ۲۰۱۱ در دوره آماری ۲۰۰۹-۲۰۰۲ و واسنجی و در دوره آماری ۲۰۱۱-۲۰۱۰ اعتبارسنجی شده است و نهایتاً کاربری اراضی سال ۲۰۲۱ در دوره آماری ۲۰۱۹-۲۰۱۲ و واسنجی و در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۲۰ اعتبارسنجی گردیده است. در ادامه، نتایج حاصله با استفاده از معیارهای آماری مختلف در هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نهایتاً ارزیابی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر پتانسیل تولید رواناب در حوضه مد نظر قرار گرفته و نتایج آن در برنامه SWAT-CUP تجزیه و تحلیل شده است. نتایج واسنجی مدل SWAT در طی سه دوره مختلف در اشکال ۸، ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. همچنین، نتایج اعتبارسنجی مدل در اشکال ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.



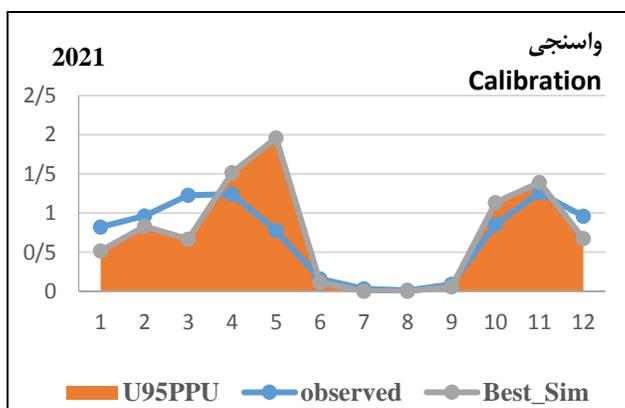
شکل ۹- منحنی رابطه رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده منطقه در دوره واسنجی ۲۰۰۹-۲۰۰۲

Fig.9. The observed and simulated runoff relationship curve of the study area in the period of 2002-2009



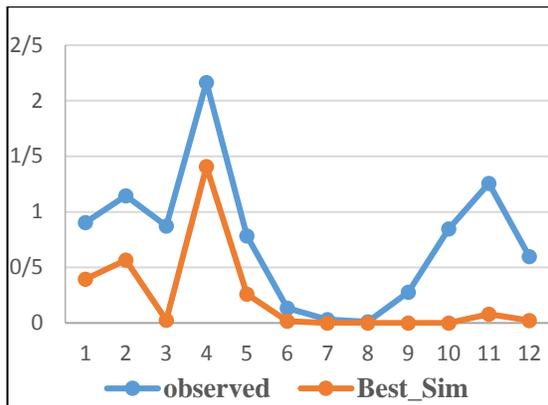
شکل ۸- منحنی رابطه رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده منطقه در دوره واسنجی ۱۹۹۹-۱۹۸۵

Fig.8. The observed and simulated runoff relationship curve of the study area in the period of 1985-1999



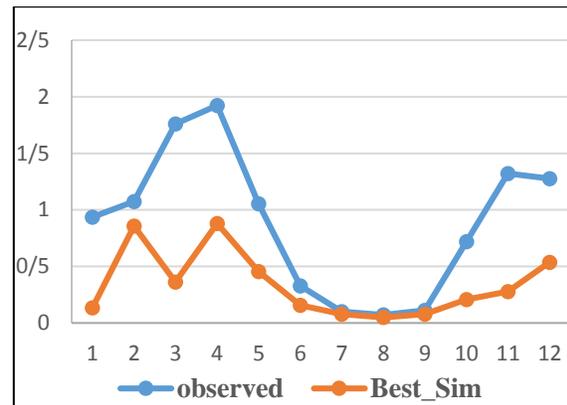
شکل ۱۰- منحنی رابطه رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده منطقه در دوره واسنجی ۲۰۱۹-۲۰۱۲

Fig.10. The observed and simulated runoff relationship curve of the study area in the period of 2012-2019



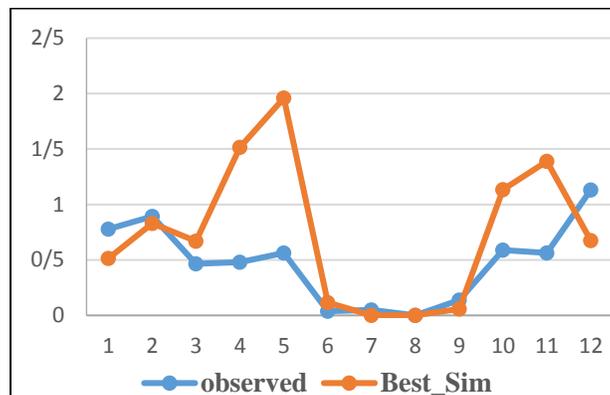
شکل ۱۲- منحنی رابطه رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده منطقه در دوره اعتبارسنجی ۲۰۱۰-۲۰۱۱

Fig.12. The observed and simulated runoff relationship curve of the study area in the validation period of 2010-2011



شکل ۱۱- منحنی رابطه رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده منطقه در دوره اعتبارسنجی ۲۰۰۰-۲۰۰۱

Fig.11. The observed and simulated runoff relationship curve of the study area in the validation period of 2000-2001

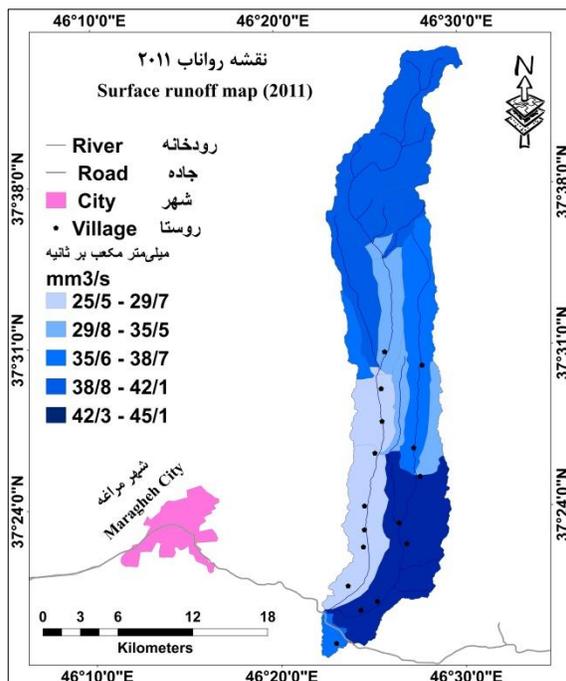


شکل ۱۳- منحنی رابطه رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده منطقه در دوره اعتبارسنجی ۲۰۲۰-۲۰۲۱

Fig.13. The observed and simulated runoff relationship curve of the study area in the validation period of 2020-2021

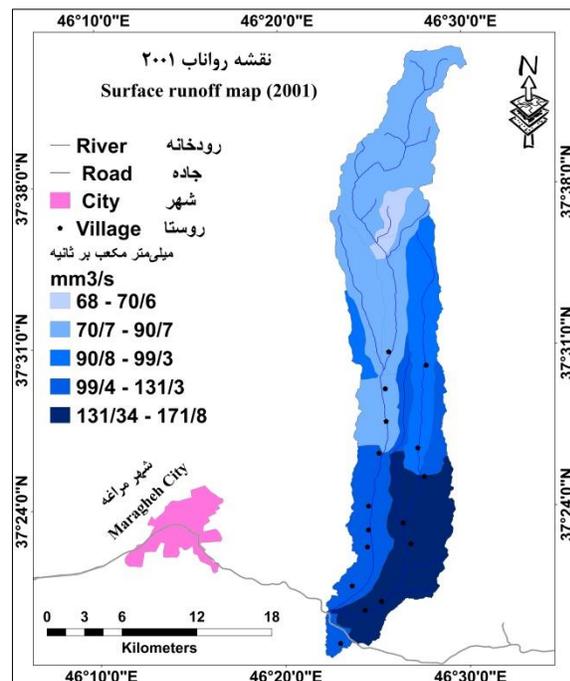
از نظر توزیع رواناب در منطقه باید گفت که در دوره اول حداکثر توزیع رواناب در نواحی جنوب و نیز جنوب شرقی مشاهده شده است در حالی که نواحی شمال و شمال غرب حوضه حداقل توزیع رواناب را نشان داده‌اند. در دوره دوم مورد مطالعه، علاوه بر نواحی جنوب و جنوب شرق، نواحی شمالی نیز روند افزایش رواناب را نشان داده‌اند در حالی که نواحی مرکزی و جنوب غربی دارای حداقل میزان رواناب در این دوره بوده‌اند. در دوره سوم نیز ارزیابی‌ها چنین نشان می‌دهند که نواحی واقع در نیمه جنوبی و شرقی حوضه مردق‌چای شاهد روند افزایش رواناب بوده‌اند که در سمت جنوب غربی یعنی منتهی‌الیه خروجی حوضه، حداکثر مقدار رواناب مشاهده می‌شود. مقایسه میزان رواناب در این سه دوره حاکی از این بوده است که در دوره اول حداکثر شدت رواناب (با مقادیر ۱۷۱/۸ - ۱۳۱/۳ میلی‌متر مکعب در ثانیه) وجود دارد اما توزیع این رواناب تنها محدود به یک زیرحوضه در جنوب شرقی منطقه بوده است. در دوره دوم نیز در همین زیرحوضه وقع در جنوب شرقی حداکثر

میزان رواناب با مقدار $45/1 - 42/2$ میلی‌متر مکعب در ثانیه مشاهده می‌شود و زیرحوضه‌های غربی و جنوب غربی حداقل میزان رواناب را نشان می‌دهند. در دوره سوم در مقایسه با دوره دوم، علاوه بر افزایش شدت رواناب، بر تعداد زیرحوضه‌های واقع در معرض حداکثر رواناب نیز افزوده شده است و به طور خاص، سه زیرحوضه در شرق، مرکز و خروجی حوضه در جنوب غرب با افزایش حداکثری رواناب ($77/8 - 67/4$ میلی‌متر مکعب در ثانیه) مواجه بوده‌اند. مطابق بررسی‌ها و مقایسه نقشه‌های توزیع مکانی رواناب با کاربری اراضی در طی مدت زمان بیست ساله (اشکال ۱۴، ۱۵ و ۱۶)، چنین نتیجه‌گیری می‌شود که روند رواناب در سطح حوضه مردق‌چای تا حد زیادی با روند تغییرات کاربری اراضی منطقه در طی همین مدت هم‌سو بوده است. از این نظر، رشد گستره اراضی مرتعی و ساخته‌شده در سطح منطقه تأثیر کاملاً مستقیمی بر افزایش رواناب در این مناطق بر جای گذاشته است و با توجه به تأثیر توپوگرافی و شیب حوضه بر روند جریان و نفوذناپذیرتر بودن سطح زمین در نواحی نیمه جنوبی حوضه نسبت به سایر نواحی آن، پتانسیل سیل‌خیزی در این نواحی بسیار بالاتر از سایر مناطق تشخیص داده شده است.



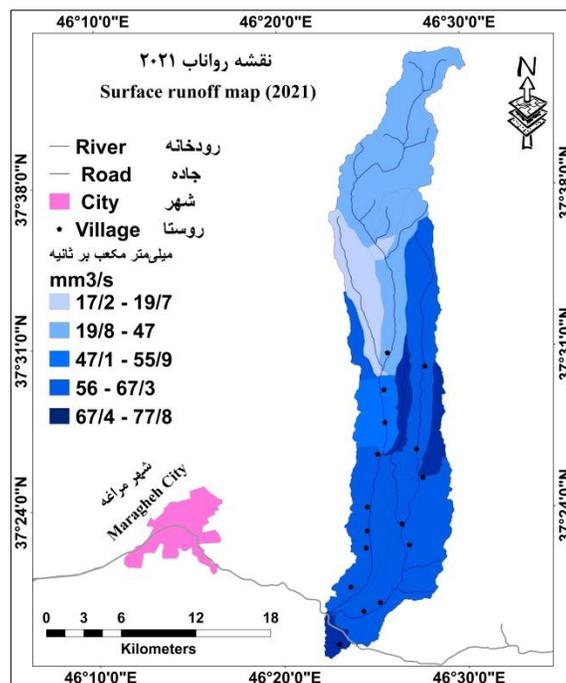
شکل ۱۵- نقشه توزیع مکانی رواناب سطحی برای دوره شبیه‌سازی ۲۰۱۲-۲۰۱۹ با کاربری اراضی سال ۲۰۱۱ (بر حسب میلی‌متر مکعب بر ثانیه)

Fig.15. Surface runoff spatial distribution map for the simulation period 2012-2019 with land use in 2011 (mm^3/s)



شکل ۱۴- نقشه توزیع مکانی رواناب سطحی برای دوره شبیه‌سازی ۱۹۸۵-۱۹۹۹ با کاربری اراضی سال ۲۰۰۱ (بر حسب میلی‌متر مکعب بر ثانیه)

Fig.14. Surface runoff spatial distribution map for the simulation period 1985-1999 with land use in 2001 (mm^3/s)



شکل ۱۶- نقشه توزیع مکانی رواناب سطحی برای دوره شبیه‌سازی ۲۰۰۹-۲۰۰۲ با کاربری اراضی سال ۲۰۲۱ (بر حسب میلی‌متر مکعب بر ثانیه)

Fig.16. Surface runoff spatial distribution map for the simulation period 2009-2019 with land use in 2021 (mm³/s)

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به مطالعه تغییر کاربری اراضی در حوضه آبریز مردق‌چای آذربایجان شرقی و بررسی تأثیر آن بر روند سیلاب پرداخته شد. با توجه به اینکه عوامل و پارامترهای متعددی در این زمینه دخیل بوده‌اند، لذا لزوم استفاده از روش‌های مناسب لازم تلقی می‌شد و بر همین اساس از تکنیک‌ها و مدل‌های مختلفی از قبیل شبکه عصبی مصنوعی، مدل‌ساز تغییرات کاربری زمین و سوات بهره گرفته شده و نتایج آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج، مدل SWAT از توانایی بالایی در تجزیه و تحلیل تأثیر تغییرات کاربری زمین بر حوضه‌های آبریز را دارا بوده است و همان‌طور که قضاوی و فاضلی (Ghazavi & Fazeli, 2019) بیان نموده‌اند، توانایی این مدل در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه‌ها در محیط GIS آن را در مقایسه با سایر مدل‌های یکپارچه متمایز ساخته است. اما با این وجود، نتایج این تحقیق حاکی از این بوده است که این مدل در مواردی نتوانسته است برآورد رضایت‌بخشی از میزان رواناب در ارتباط با کاربری اراضی انجام دهد و برخی از شبیه‌سازی‌ها در محدوده خارج از باند عدم قطعیت قرار گرفته است. با توجه به موقعیت و فیزیوگرافی حوضه مردق‌چای، ضعف مدل سوات در تحقیق حاضر می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد. اولین دلیل ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف است؛ دومین دلیل ناشی از تغییرات کاربری اراضی منطقه در طول زمان و سومین دلیل مربوط به فقدان ایستگاه هواشناسی در منطقه می‌باشد که در این مطالعه از داده‌های ایستگاه مراغه در تجزیه و تحلیل‌ها استفاده شده است. از طرفی دیگر، در ارتباط با نقش کاربری اراضی در روند سیلاب منطقه باید گفت که تغییرات زمانی - مکانی کاربری و پوشش زمین در نواحی مختلف

حوضه تأثیر کاملاً محسوسی بر میزان رواناب و جاری شدن سیل در منطقه دارد به طوری که در نیمه جنوبی و به ویژه نواحی جنوبی و جنوب شرقی حوضه به دلیل اینکه پوشش گیاهی مرتعی غالب بوده و اراضی مسکونی نیز روند افزایشی داشته‌اند، موجب این شده است که ضریب جذب رواناب در مقایسه با سایر نواحی کمتر و ارتفاع رواناب افزایش یابد که می‌تواند بر احتمال وقوع سیلاب در این نواحی بیافزاید. همچنین، واقع شدن این نواحی در مسیر شیب حوضه و جریان آبراهه که خروجی آن در منتهی الیه جنوب غربی قرار گرفته است، ممکن است که خطر سیلاب را در این نواحی تشدید نماید. بر اساس نتایج، وجود داده‌های ورودی دقیق برای اجرای مدل SWAT از اهمیت زیادی برخوردار بوده و به منظور دستیابی به نتایج بهینه پیشنهاد می‌شود که به این امر توجه کافی لحاظ شود و در صورت فقدان داده‌ها و اطلاعات کافی از منطقه می‌توان از مدل‌های دیگری به موازات این مدل استفاده گردد. در مطالعات آتی می‌توان به تهیه نقشه پتانسیل خطر سیل و اولویت‌بندی زیرحوضه‌های مختلف با هدف مدیریت خطرپذیری آن پرداخته و اقدامات بعدی به موازات آن در نظر گرفته شود تا بدین وسیله آمادگی، واکنش‌ها و فرآیندهای کاهش و بازیابی در صورت وقوع سیل به درستی به انجام برسد.

References

- Achugbu, I. C., Olufayo, A. A., Balogun, I. A., Dudhia, J., McAllister, M., Adefisan, E. A., & Naabil, E. (2022). Potential effects of Land Use Land Cover Change on streamflow over the Sokoto Rima River Basin. *Heliyon*, 8(7), e09779. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09779>
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508. <https://doi.org/10.13031/2013.42256>
- Bakhtiyari, M., Komeh, Z., & Memarian, H. (2018). A Comparison of Fuzzy Analytic Hierarchy Process, Artificial Neural Network and Area Density in Quantitative Evaluation and Landslide Susceptibility Mapping within GIS Framework (Case Study: Simereh Homiyen Watershed). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 7(3), 19-40. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.67234>
- Choto, M., & Fetene, A. (2019). Impacts of land use/land cover change on stream flow and sediment yield of Gojeb watershed, Omo-Gibe basin, Ethiopia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 14, 84-99. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.01.003>
- Dastres, R., & Soori, M. (2021). Artificial neural network systems. *International Journal of Imaging and Robotics (IJIR)*, 21(2), 13-25. <https://hal.science/hal-03349542v1>
- Eastman, J. R., & Toledano, J. (2018). A short presentation of the Land Change Modeler (LCM). *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*, 499-505. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60801-3_36
- Ghazavi, R., & Fazeli, A. (2019). Investigation the effects of land use change on surface runoff using Remote sensing and SWAT model. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(6), 191-206. [In Persian] <https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.12697.2739>
- Haleem, K., Khan, A. U., Ahmad, S., Khan, M., Khan, F. A., Khan, W., & Khan, J. (2022). Hydrological impacts of climate and land-use change on flow regime variations in upper Indus basin. *Journal of Water and Climate Change*, 13(2), 758-770. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.238>
- Khoi, D. N., Loi, P. T., & Sam, T. T. (2021). Impact of future land-use/cover change on streamflow and sediment load in the Be River Basin, Vietnam. *Water*, 13(9), 1244. <https://doi.org/10.3390/w13091244>

- Maru, H., Hailelassie, A., Zeleke, T., & Teferi, E. (2023). Analysis of the impacts of land use land cover change on streamflow and surface water availability in Awash Basin, Ethiopia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1), 1-25. <https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2163193>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., & King, K. W. (2005). *Soil and water assessment tool: theoretical documentation*.
- Rahmati, F., Rezaei Moghaddam, M. H., & Nikjoo, M. R. (2021). The Effects of Land use Change on Erosion & Flood in Saqqez basin before & after Shahid Kazemi Dam Construction, Arc Swat model. *Geography and Human Relationships*, 4(1), 127-144. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gahr.2021.285039.1545>
- Rezaei Moghaddam, M. H., & Rahimpour, T. (2024). Preparation of flood hazard potential map using two methods: Frequency Ratio and Statistical Index (Case study: Aji Chai Basin). *Environmental Management Hazards*, 10(4), 291-308. [In Persian] https://jhsci.ut.ac.ir/article_95951.html?
- Salarin, F., Tatian, M. R., Ghanghermeh, A., & Tamartash, R. (2022). Modeling land cover changes in Golestan province using land change modeler (LCM). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 12(4), 47-70. [In Persian] <https://doi.org/10.30495/girs.2021.681267>
- Shirani, K., Heydari, F., & Arabameri, A. (2017). Comparison of artificial neural network and multivariate regression methods in landslide hazard zonation, case study: Vanak Basin, Isfahan province. *Watershed Engineering and Management*, 9(4), 451-464. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.101725.1031>
- Sugianto, S., Deli, A., Miswar, E., Rusdi, M., & Irham, M. (2022). The effect of land use and land cover changes on flood occurrence in Teunom Watershed, Aceh Jaya. *Land*, 11(8), 1271. <https://doi.org/10.3390/land11081271>
- Tali, M. P. A. (2011). *Land use/land cover change and its impact on flood occurrence: a case study of upper Jhelum floodplain*. (Master's thesis). University of Kashmir.
- Yari, M., Soltani-Gerdefaramarzi, S., & Ghasemi, M. (2019). Investigation of the Effect of to Land Use Changes on Flood Hydrograph and Fluctuations of Groundwater Level in Part of Ghareh Souh Basin. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 8(3), 41-58. <https://doi.org/10.22067/geoeh.2024.88423.1493>



Structural Analysis and Regime Shift of Drought in Iran Using a Three-Dimensional Clustering Approach

Javad Mahdizadeh Soula ¹, Yousef Ghavidel Rahimi ^{2*}, Manuchehr Farajzadeh ³

^{1,2 & 3}Department of Physical Geography, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 05 June 2025

Revised: 02 July 2025

Accepted: 03 August 2025

Available Online: 05 August 2025

Keywords:

Spatiotemporal Analysis of Drought

Three-Dimensional Drought Clustering

Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index (scPDSI)

Drought Regime Shift

Climate Variability

This study investigates the structural evolution and regime shifts of droughts in Iran from 1958 to 2022 using a three-dimensional (3D) clustering framework. The analysis employed high-resolution (~4 km) climate data from the TerraClimate dataset. Drought clusters were identified as continuous spatiotemporal events by applying thresholding to the Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index (scPDSI), a widely used measure of drought intensity, and extracting connected components within the data cube. To refine the results, a minimum-size filter was applied, with the optimal value determined through a geometric optimization method based on curvature analysis (cos C method). The findings reveal a substantial transformation in Iran's drought patterns, particularly after 2000, when short, sporadic episodes gave way to more persistent and spatially extensive drought systems. Among the five drought thresholds tested, the moderate level (scPDSI = -2.0) provided the most balanced trade-off between event frequency and spatial coverage. In parallel, a minimum cluster size of 16 voxels was identified as the geometric filter threshold, effectively reducing noise from small, transient clusters while preserving significant drought events and enhancing structural coherence. Results show that, since 2000, drought clusters have become larger, longer-lasting, and more spatially synchronized. Moreover, regions in central, western, northeastern, and northwestern Iran-previously less affected by severe drought-have emerged as new hotspots, experiencing marked increases in both frequency and duration. By integrating 3D clustering with threshold optimization, this study introduces a methodological innovation in drought research. The approach not only advances scientific understanding of spatiotemporal drought dynamics but also provides practical value for improving drought monitoring, informing adaptation planning, and strengthening early warning systems in Iran and other arid regions.

* Corresponding author: Dr. Yousef Ghavidel Rahimi

E-mail address: ghavidel@modares.ac.ir

How to cite this article: Mahdizadeh Soula, J., Ghavidel Rahimi, Y., & Farajzadeh, M. (2025). Structural Analysis and Regime Shift of Drought in Iran Using a Three-Dimensional Clustering Approach. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 93-115. <https://doi.org/10.22067/geoeH.2025.94525.1597>



©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

Drought is a complex environmental hazard with profound ecological, agricultural, and social impacts. In Iran's arid and semi-arid climates, its increasing frequency and severity have heightened risks to water and land resources. Conventional studies often rely on indices such as the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Palmer Drought Severity Index (PDSI), but these approaches typically lack the spatiotemporal continuity needed to capture drought dynamics fully.

To address this limitation, we applied a three-dimensional (3D) clustering framework to monthly Self-Calibrating PDSI (scPDSI) data (1958–2022) from the high-resolution TerraClimate dataset. Using connected-component labeling and geometric threshold optimization, we identified and analyzed coherent spatiotemporal drought clusters across Iran. The objective was to evaluate structural patterns and regime shifts in drought behavior, offering a novel contribution to both drought monitoring and adaptation planning.

Material and Methods

We adopted a multi-step observational framework, adapted from Diaz et al. (2024), to analyze drought events in Iran (1958–2022). The process involved: (1) 3D connected-component labeling to identify continuous drought clusters; (2) cluster-size filtering to eliminate insignificant structures; and (3) threshold sensitivity analysis to determine optimal drought intensity levels.

Drought severity was measured using scPDSI derived from TerraClimate (~4 km resolution gridded climate variables). Data were processed in MATLAB by constructing a 3D data cube (latitude–longitude–time) and classifying drought conditions with five thresholds (–0.5 to –4.0). The resulting binary maps enabled the detection, filtering, and analysis of major drought events.

Results and Discussion

Over 7,400 drought clusters were identified across Iran between 1958 and 2022. Cluster number, size, and duration varied strongly with both scPDSI threshold and minimum-size filter. At more lenient thresholds (e.g., –0.5), clusters were abundant but small and short-lived; at more stringent thresholds (e.g., –4), clusters were fewer but spatially extensive and temporally persistent.

Geometric optimization (cos C method, based on curvature analysis) identified an optimal threshold of scPDSI = –2 with a minimum cluster size of 16 voxels. This balance retained hydrologically relevant events while reducing noise. Temporal analysis revealed a rising trend in the percentage of land under drought (PDA) since 2000, with increasingly frequent and spatially synchronized episodes. Moderate droughts (–2) peaked in the late 1960s, early 1980s, and after 2000, while extreme droughts (–4) intensified post-2000. Spatial mapping showed persistent droughts in central, western, and northeastern provinces, with newly emerging hotspots in Golestan, Ardabil, and Razavi Khorasan.

These results suggest a regime shift in Iran's drought behavior over the past two decades, characterized by events that are more chronic, widespread, and synchronized. Such findings highlight the inadequacy of short-term or localized interventions and emphasize the need for integrated, long-term adaptation strategies.

Conclusion

This study presents a comprehensive structural analysis of drought events in Iran (1958–2022) using a novel 3D clustering framework applied to high-resolution scPDSI data. The approach captured droughts as continuous spatiotemporal entities, independent of administrative or station-based constraints.

Findings reveal a post-2000 regime shift toward longer, more frequent, and more extensive droughts, likely linked to climate change and large-scale ocean–atmosphere variability. Optimal detection was achieved with scPDSI = –2.0 and a cluster-size filter of 16 voxels, which balanced event frequency and reliability. Spatial analysis further identified newly emerging drought hotspots in central, western, and northern provinces, underscoring the need for updated risk maps and adaptive strategies.

The 3D clustering approach offers a transferable tool for advanced drought monitoring in arid regions globally. Future research should integrate climate change projections and link drought clusters to socioeconomic and ecological impacts to strengthen resilience at national and regional scales.



تحلیل ساختار و تغییر رژیم خشکسالی در ایران با رویکرد خوشه‌بندی سه بعدی

جواد مهدی زاده سولا^۱، یوسف قوبدل رحیمی^{۲*}، منوچهر فرج زاده اصل^۳

^{۱،۲} گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>تاریخچه مقاله:</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲</p>	<p>این پژوهش به تحلیل ساختار و تغییر رژیم خشکسالی‌های ایران طی دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ با بهره‌گیری از رویکرد خوشه‌بندی سه بعدی می‌پردازد. در این راستا، داده‌های اقلیمی با وضوح مکانی بالا (در حدود ۴ کیلومتر) از مجموعه داده‌های TerraClimate مورد استفاده قرار گرفته است. با آستانه‌گذاری مقادیر scPDSI و شناسایی مؤلفه‌های متصل در فضای مکان-زمان، خوشه‌های خشکسالی به‌عنوان رخداد‌های پیوسته استخراج گردیدند. جهت پالایش خوشه‌ها، فیلتر حداقل اندازه اعمال شد که مقدار بهینه آن بر اساس روش بهینه‌سازی هندسی زاویه تعیین گردید. نتایج نشان می‌دهد رژیم خشکسالی ایران، به‌ویژه پس از دهه ۲۰۰۰ دچار دگرگونی چشمگیری شده است؛ به‌طوری‌که الگوی غالب از رخداد‌های پراکنده و کوتاه‌مدت به سامانه‌های پایدارتر و گسترده‌تر تبدیل شده است. در تحلیل پنج آستانه مختلف شدت خشکسالی، آستانه خشکسالی متوسط (۲-) به‌عنوان آستانه بهینه شناسایی شد که توازن مطلوبی میان فراوانی و گستره مکانی خوشه‌ها ایجاد می‌کند. همچنین فیلتر هندسی ۱۶ وکسل (voxel) به‌عنوان حداقل اندازه خوشه تعیین شد که با حذف نوفه (خوشه‌های کوچک و گذرا) و حفظ رخداد‌های معنادار، انسجام بالاتری به نتایج می‌بخشد. یافته‌ها حاکی از آن است که بعد از سال ۲۰۰۰، خوشه‌های خشکسالی بزرگ‌تر، بادوام‌تر و از نظر مکانی وسیع‌تر شده‌اند. به‌موازات این تغییر رژیم، مناطق مرکزی، غربی، شمال شرقی و شمال غربی کشور که پیش‌تر کمتر در کانون خشکسالی‌های شدید بودند به کانون‌های جدید خشکسالی‌های پایدار تبدیل شده‌اند و تعداد و طول دوره‌های خشکسالی در آن‌ها به طور معناداری افزایش یافته است. این چارچوب خوشه‌بندی سه بعدی و بهینه‌سازی آستانه، نوآوری روش‌شناختی مهمی را در مطالعه خشکسالی ارائه می‌دهد و می‌تواند به درک علمی عمیق‌تر و بهبود برنامه‌ریزی‌های سازگاری و هشدار پیش‌هنگام خشکسالی در ایران کمک کند.</p>
<p>کلمات کلیدی:</p> <p>تحلیل فضایی-زمانی خشکسالی خوشه‌بندی سه‌بعدی شاخص شدت خشکسالی پالمر خودکالیبره (scPDSI) تغییر رژیم خشکسالی تغییر پذیری اقلیمی</p>	

مقدمه

خشکسالی یکی از پیچیده‌ترین و گسترده‌ترین مخاطرات اقلیمی به شمار می‌رود که در ابعاد مکانی و زمانی به صورت هم‌زمان گسترش یافته و آثار پایداری بر اکوسیستم‌ها، بخش کشاورزی و جوامع انسانی برجای می‌گذارد. این پدیده در گذشته صرفاً به صورت کاهش بارندگی طی یک دوره زمانی تعریف می‌شد؛ اما در دهه‌های اخیر، با توجه به افزایش فهم علمی از رفتار خشکسالی، به‌عنوان پدیده‌ای چندبُعدی شناخته شده است که ویژگی‌هایی همچون ناهمگنی فضایی، تداوم زمانی، و پویایی‌های پیچیده‌ی انتشار را در بر می‌گیرد (Andreadis, Clark, Wood, Hamlet & Lettenmaier, 2005; World Meteorological Organization, 2012). این تحول مفهومی منجر به توسعه چارچوب‌های تحلیلی نوینی شده است که به جای تکیه صرف بر شاخص‌های زمانی، امکان تحلیل هم‌زمان مدت، شدت، گستره مکانی و حتی مسیرهای حرکتی خشکسالی را فراهم می‌سازند (Herrera-Estrada & Diffenbaugh 2020, Wei et al., 2025).

در این میان، پیشرفت چشم‌گیر در تولید داده‌های شبکه‌ای با تفکیک‌پذیری مکانی بالا، به ویژه مجموعه داده‌های Terra Climate (Abatzoglou, Dobrowski, Parks & Hegewisch, 2018)، CHIRPS (Funk et al., 2015) و MSWEP (Beck et al., 2019) فرصت مناسبی برای پایش و تحلیل خشکسالی در مناطق فاقد پوشش ایستگاهی فراهم کرده است. در حوزه سنجش شدت و تداوم خشکسالی، شاخص پالمر (PDSI) و به‌ویژه نسخه خودتنظیم آن (scPDSI)، به‌واسطه ترکیب بارش، دما و تبخیر و تعرق بالقوه، به‌عنوان ابزاری کارآمد برای مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده گسترده قرار گرفته است (Wells, Goddard & Hayes, 2004). کارایی scPDSI در بازنمایی شرایط رطوبتی بلندمدت در بسیاری از نقاط جهان، از جمله ایران، مورد تأیید قرار گرفته است (Gebrechorkos, Hülsmann & Bernhofer, 2019; Sadeghi, Ghavidel & Farajzadeh, 2022).

ایران به دلیل اقلیم خشک و نیمه‌خشک، بارندگی محدود، و پراکنش نامتوازن منابع آب، به شدت در معرض خطر خشکسالی قرار دارد. میانگین بارش سالانه در بخش وسیعی از کشور کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر است (Peel, Finlayson & McMahon, 2007; Vaghefi et al., 2019; Fathi Taperasht, Shafizadeh-Moghadam & Kouchakzadeh, 2022; Najafi & Alizadeh, 2023). تنوع توپوگرافی و اقلیمی از ارتفاعات البرز و زاگرس تا دشت‌های مرکزی، واکنش‌های متفاوتی را در برابر کم‌بارشی ایجاد کرده و شرایط را برای بروز و تشدید خشکسالی فراهم ساخته است (Alayi-Talaghani, 2009; Khosravi, Abbasnia, Ghobadi & Armesh, 2017). در سال‌های اخیر، خشکسالی‌های مکرر منجر به افت شدید منابع آب، کاهش عملکرد کشاورزی و افزایش آسیب‌پذیری معیشت‌های محلی شده‌اند (Madani, 2014; Cook, Ault & Smerdon, 2015; Forootan et al., 2017). با وجود اهمیت موضوع، اغلب مطالعات انجام‌شده در ایران، مبتنی بر شاخص‌هایی مانند SPI، SPEI و PDSI، عمدتاً در مقیاس محلی یا استانی و بر پایه داده‌های نقطه‌ای بوده‌اند (Hosseini, Ghavidel & Farajzadeh, 2021; Razmi, Sotoudeh, Ghane & Ostad, 2022). این رویکردها به دلیل ضعف در تفکیک مکانی و پوشش زمانی پیوسته، قادر به نمایش کامل ساختار، تداوم و مسیرهای مکانی خشکسالی نیستند. علاوه‌براین، پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که نه فقط ویژگی‌های فردی خشکسالی، بلکه هم‌پوشانی آن با پدیده‌هایی چون موج گرما یا خشکسالی کشاورزی نیز اثرگذاری آن را تشدید می‌کند (Yang et al., 2024; Liu, Hu & Mo, 2025).

در این راستا، ضرورت استفاده از روش‌هایی نوین که بتوانند رفتار خشکسالی را در قالب پدیده‌ای یکپارچه در بستر مکان-زمان تحلیل کنند، بیش‌ازپیش احساس می‌شود. یکی از نوآوری‌های مهم در این زمینه، بهره‌گیری از الگوریتم‌های خوشه‌بندی سه بعدی است که خشکسالی را به‌عنوان شیء پیوسته در فضا-زمان (عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی، زمان) شناسایی می‌کنند و تحلیل هم‌زمان ویژگی‌هایی مانند شدت، وسعت، مدت و مسیر انتشار را امکان‌پذیر می‌سازند (Lloyd-Hughes, 2012; Herrera-Estrada & Diffenbaugh, 2020). برای نمونه پیارالی و همکاران (Pyarali, Peng, Disse & Tuo, 2022) و ورنیوو و همکاران (Vernieuwe, De Baets & Verhoest, 2020) با استفاده از خوشه‌بندی پدیده‌محور، به ردیابی رویدادهای خشکسالی در مقیاس‌های منطقه‌ای و قاره‌ای پرداخته‌اند. چارچوب ارائه‌شده توسط دیاز و همکاران (Diaz, Corzo Perez, Van Lanen & ...)

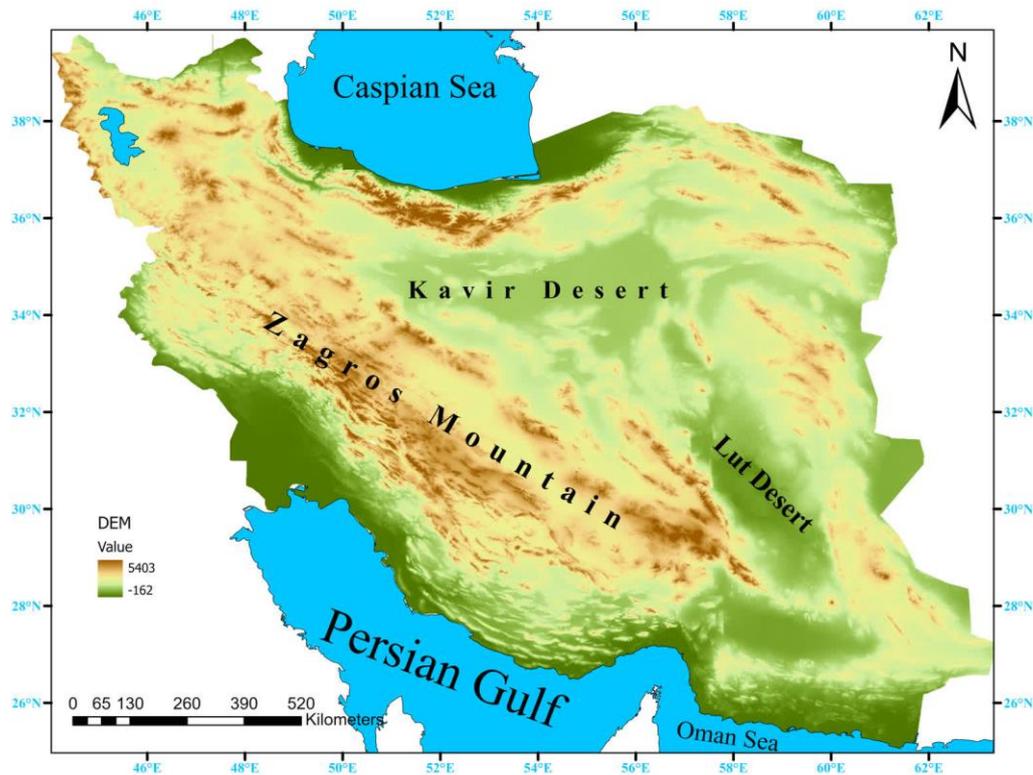
(Solomatine, 2024) یکی از پیشرفته‌ترین نمونه‌های این رویکرد است که با ترکیب مؤلفه‌های متصل سه بعدی، فیلترهای اندازه و آستانه شدت، ابزار قدرتمندی برای استخراج و تحلیل رخدادهای معنادار خشکسالی فراهم می‌کند. از سوی دیگر، مطالعات جدید به ابعاد پیچیده‌تری از خشکسالی نیز پرداخته‌اند، از جمله خشکسالی‌های مرکب و هم‌زمان با موج گرما یا خشکسالی کشاورزی، برای مثال لیو و همکاران (Liu et al., 2025) روند افزایشی رخدادهای هم‌زمان خشکسالی و موج گرما را در چین نشان داده‌اند و یانگ و همکاران (Yang et al., 2024) نیز با مدل Vine Copula، نقش مؤلفه‌هایی چون مدت و گستره مرکب را در بروز خشکسالی‌های کشاورزی تأیید کرده‌اند. یافته‌های وانگ و همکاران (Wang, Jia, Tang & Liu, 2025) نیز بیانگر الگوهای وابسته فضایی معنادار در ریسک خشکسالی میان استان‌های همجوار است که بر لزوم بهره‌گیری از روش‌های ساختارمحور و پویایی‌محور دلالت دارد.

با وجود پیشرفت‌های اخیر در تحلیل‌های مکانی - زمانی خشکسالی، در ایران همچنان خلأ قابل توجهی در استفاده از رویکردهای سه بعدی و داده‌های با تفکیک بالا برای شناسایی و پایش ساختارهای پیچیده خشکسالی وجود دارد. پژوهش حاضر باهدف پر کردن این شکاف، برای نخستین بار در مقیاس ملی، از چارچوب خوشه‌بندی سه بعدی توسعه‌یافته برای تحلیل جامع خشکسالی‌های ایران طی دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ بهره گرفته است. این چارچوب بر پایه داده‌های شاخص خود تنظیم پالم از پایگاه TerraClimate با تفکیک‌پذیری مکانی ۴~ کیلومتر بنا شده و شامل الگوریتم شناسایی مؤلفه‌های متصل، پالایش خوشه‌ها بر اساس آستانه بهینه، و تحلیل ویژگی‌های ساختاری نظیر: مدت، شدت، گستره و مکان خشکسالی‌هاست. همچنین، با تمرکز بر دهه‌های اخیر، این مطالعه تلاش دارد تا گذار احتمالی رژیم خشکسالی ایران به سوی الگوهای پایدارتر و شدیدتر را نیز ارزیابی کند و بستری برای تحلیل‌های پیش‌نگرانه و سیاست‌گذاری اقلیمی فراهم آورد.

منطقه مورد مطالعه

کشور ایران (شکل ۱) با گستره‌ای در حدود ۱,۶۴۸,۱۹۵ کیلومتر مربع، بین عرض‌های جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه‌ی شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۴ تا ۶۳.۵ درجه‌ی شرقی واقع شده و به‌عنوان دومین کشور پهناور منطقه‌ی غرب آسیا شناخته می‌شود. موقعیت جغرافیایی ایران در محل همگرایی سامانه‌های پرفشار جنب‌حاره‌ای اوراسیا و کمربند خشک جنوب‌غرب آسیا، همراه با ساختار پیچیده توپوگرافی شامل رشته‌کوه‌ها، فلات‌های داخلی و حوضه‌های وسیع بیابانی، زمینه‌ساز شکل‌گیری شرایط اقلیمی بسیار متنوع در سراسر کشور شده است (Peel et al., 2007; Najafi & Alizadeh, 2023; Khosravi et al., 2017).

یکی از مؤلفه‌های اقلیمی مؤثر بر اقلیم ایران، نزدیکی این سرزمین به مدار رأس‌السرطان است که ایران را در کمربند جهانی خشکی نیمکره شمالی قرار می‌دهد (Alayi-Talaghani, 2009). این موقعیت منجر به دریافت شدید تابش خورشیدی، افزایش تبخیر و تعرق بالقوه و گسترش کم‌آبی، به‌ویژه در مناطق مرکزی و شرقی کشور شده است. اختلاف ارتفاع قابل توجه از سواحل مرطوب دریای خزر در شمال تا بیابان خشک لوت در جنوب شرق کشور، منجر به شکل‌گیری پهنه‌های اقلیمی متنوعی شده است که نقشی تعیین‌کننده در رفتار مکانی خشکسالی ایفا می‌کنند. این تنوع اقلیمی که تحت تأثیر عرض جغرافیایی، اختلاف ارتفاع و فاصله از منابع رطوبتی شکل گرفته است، پیامدهای مهمی برای آسیب‌پذیری در برابر خشکسالی و مدیریت منابع آب در کشور دارد. تفاوت‌های منطقه‌ای اقلیم بر ضرورت به‌کارگیری روش‌هایی تأکید می‌گذارند که ابعاد فضایی و زمانی رخدادهای خشکسالی را به صورت هم‌زمان مورد توجه قرار دهند. به‌ویژه، این وضعیت نیاز به بهره‌گیری از روش‌های دقیق و با تفکیک مکانی بالا (نظیر خوشه‌بندی سه بعدی خشکسالی) را برای تحلیل نحوه شکل‌گیری، گسترش و تشدید خشکسالی در مناطق متنوع اکولوژیکی و اقلیمی ایران برجسته می‌سازد.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

Fig. 1. Study Area

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، برای شناسایی و تحلیل ساختاری خشکسالی‌ها در ایران از یک چارچوب نوین خوشه‌بندی سه بعدی مکانی-زمانی بهره گرفته شد که بر اساس مدل مفهومی ارائه شده توسط دیاز و همکاران (Diaz et al., 2024) طراحی گردید. این چارچوب شامل شناسایی مؤلفه‌های پیوسته، پالایش خوشه‌ها بر مبنای اندازه و دوام، و بهینه‌سازی آستانه‌های شدت است و امکان تحلیل یکپارچه شدت، گستره و پویایی رخداد‌های خشکسالی را فراهم می‌کند.

شاخص مورد استفاده برای سنجش شدت خشکسالی، (scPDSI¹) بود که به دلیل تنظیم خودکار ضرایب اقلیمی، قابلیت مقایسه‌پذیری مکانی و پاسخ دقیق به ناهنجاری‌های رطوبتی بلندمدت، به‌ویژه در مناطق خشک ایران، گزینه‌ای مناسب محسوب می‌شود (Wells et al., 2004). داده‌های شاخص خودتنظیم پالمر از پایگاه جهانی TerraClimate² استخراج شدند؛ پایگاهی که مجموعه‌ای از متغیرهای اقلیمی شامل بارش، دما، تبخیر و تعرق بالقوه و شاخص PDSI را در بازه زمانی ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ به صورت ماهانه و با وضوح مکانی تقریبی ۴ کیلومتر پوشش می‌دهد (Abatzoglou et al., 2018). با توجه به ناهمگونی توپوگرافی ایران و پراکندگی مکانی ایستگاه‌های زمینی، داده‌های TerraClimate، گزینه‌ای مناسب برای پیش‌مقیاس ملی خشکسالی در مقیاس شبکه‌ای به‌شمار می‌روند.

در راستای سنجش اعتبار این داده‌ها برای اقلیم ایران، عراقی و همکاران (Araghi, Martinez & Adamowski, 2023) به مقایسه داده‌های TerraClimate با مشاهدات ایستگاهی در مناطق مختلف اقلیمی کشور پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که این پایگاه عملکرد بسیار مناسبی در برآورد تابش خورشیدی ($R^2 = 0.95-0.98$)، دمای حداقل و حداکثر ($R^2 = 0.98-0.99$) و

1- Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index

2 - <http://www.climatologylab.org/terraclimate.html>

بارندگی ($R^2 = 0.70-0.85$) دارد. این یافته‌ها مؤید آن است که داده‌های TerraClimate می‌توانند به‌عنوان منبعی معتبر برای مطالعات اقلیمی و خشکسالی در ایران مورد استفاده قرار گیرند.

تمام داده‌های شاخص خودتنظیم پالمر در محیط نرم‌افزاری MATLAB پردازش شده‌اند. در این فرایند، ابتدا ماتریس داده‌ای چهاربعدي با ابعاد $(481 \times 361 \times 780)$ شامل طول و عرض جغرافیایی، زمان و مقادیر شاخص خودتنظیم پالمر تشکیل شد. سپس، با اعمال مقادیر آستانه‌ای شامل ۰.۵، -۱، -۲، -۳ و -۴ (بر اساس طبقه‌بندی استاندارد شدت خشکسالی پالمر)، نقشه‌های دودویی ماهانه ایجاد گردید. در این مرحله، سلول‌های مکانی-زمانی (وکسل‌ها) که مقدار آن‌ها کمتر از آستانه بود، به‌عنوان نقاط خشکسالی (با مقدار ۱) و سایر نقاط در کلاس غیرخشکسالی (با مقدار ۰) دسته‌بندی شدند (جدول ۱).

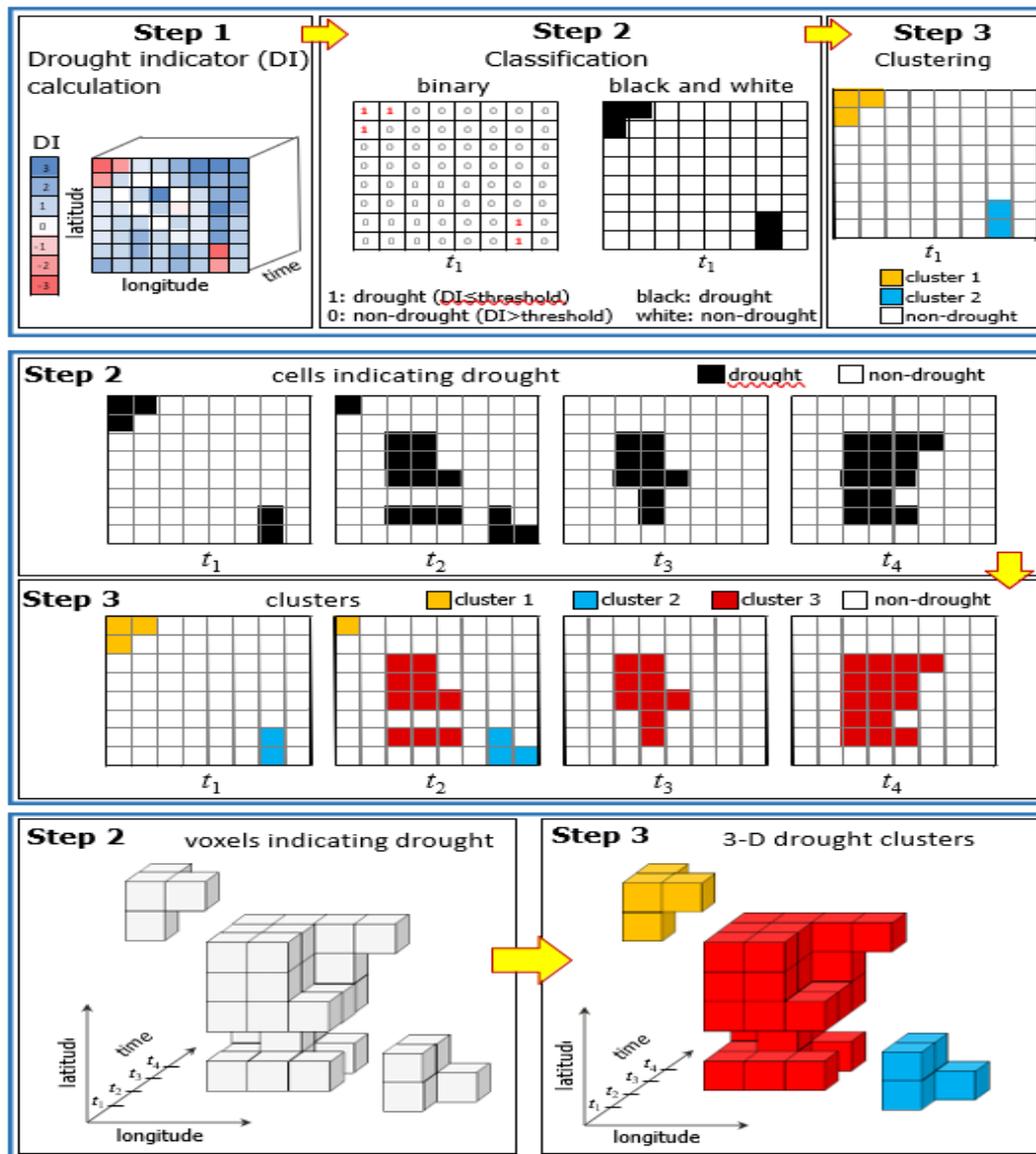
این پژوهش از نوع مطالعات کاربردی با رویکرد توصیفی - تحلیلی و مبتنی بر داده‌های ثانویه اقلیمی با رویکرد کمی است. با بهره‌گیری از شاخص scPDSI و چارچوب خوشه‌بندی سه بعدی، به تحلیل ساختارهای زمانی - مکانی خشکسالی در ایران طی سال‌های ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ پرداخته شد. این رهیافت داده‌محور، بستری مناسب برای تحلیل دینامیک فراوانی، شدت، طول عمر و الگوهای فضایی خشکسالی در مقیاس ملی فراهم ساخت.

جدول ۱- طبقه‌بندی خشکسالی براساس شاخص شدت خشکسالی خود تنظیم پالمر (scPDSI)

Table 1- Drought Classification Based on the Self-Calibrated Palmer Drought Severity Index (Wells et al., 2004)

مقدار شاخص scPDSI Value	طبقه‌بندی خشکسالی Drought Category
> 4	رطوبت بسیار شدید (Extremely Wet)
3 ~ 4	به‌شدت مرطوب (Severely Wet)
2 ~ 3	رطوبت متوسط (Moderately Wet)
1 ~ 2	رطوبت خفیف (Slightly Wet)
0.5 ~ 1	آغاز دوره تر (Incipient Wet Spell)
-0.5 ~ 0.5	تقریباً نرمال (Near Normal)
-1 ~ -0.5	آغاز دوره خشکسالی (Incipient Dry Spell)
-2 ~ -1	خشکسالی خفیف (Slightly Dry)
-3 ~ -2	خشکسالی متوسط (Moderately Dry)
-4 ~ -3	خشکسالی شدید (Severely Dry)
< -4	خشکسالی بسیار شدید (Extremely Dry)

برای شناسایی خوشه‌های مکانی-زمانی پیوسته خشکسالی، الگوریتم برچسب‌گذاری مؤلفه‌های متصل سه بعدی (3D Connected Components) مورد استفاده قرار گرفت. این الگوریتم که بر اساس همسایگی ۲۶ جهته در فضا عمل می‌کند (Haralick & Shapiro, 1992; Diaz, Perez, Van Lanen, Solomatine & Varouchakis, 2020)، قادر است ساختارهای حجمی متصل درون مکعب فضا - زمان را شناسایی کرده و به هر خوشه خشکسالی برچسب یکتایی اختصاص دهد. این فرایند در MATLAB پیاده‌سازی و برای داده‌های با مقیاس بزرگ ایران بهینه‌سازی گردید (شکل ۲).

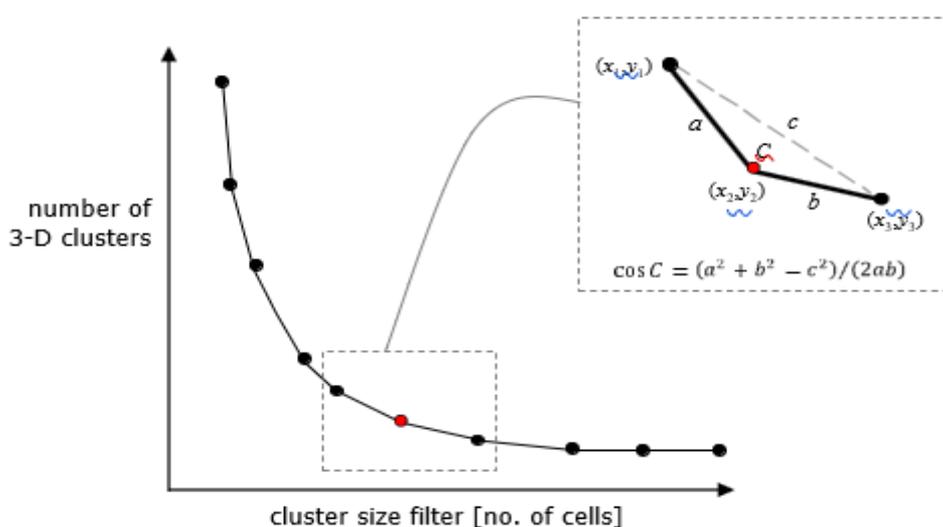


شکل ۲- نمای شماتیک از روش محاسبه خوشه‌های خشکسالی سه بعدی (3-D) فرایند شامل سه گام اصلی است: (گام ۱) محاسبه شاخص خشکسالی، (گام ۲) طبقه‌بندی و کسل‌ها به حالت خشکسالی و غیرخشکسالی، (گام ۳) محاسبه خوشه‌های سه بعدی خشکسالی. پنل‌های میانی و پایینی، نمای دو بعدی و سه بعدی در هر گام زمانی (t) را نشان می‌دهند. توجه شود که در فضای دو بعدی از واژه سلول (cell) و در فضای سه بعدی از واژه وکسل (voxel) استفاده می‌شود.

Fig.2. Schematic overview of the methodology for 3-D drought cluster calculation: drought indicator calculation (Step 1), classification of voxels in drought (Step 2), and 3-D cluster calculation (Step 3). The middle and bottom panels provide 2-D and 3-D views at each time step (t). Note that when we refer to the 2-D space, we use the term cell, while in the 3-D space we use voxel. (Diaz et al., 2024)

در ادامه، به منظور افزایش انسجام ساختاری و حذف نوفه‌های آماری، خوشه‌های کوچک از تحلیل حذف شدند. برخلاف مطالعاتی که به صورت تجربی اقدام به انتخاب آستانه فیلتر می‌نمایند، در این پژوهش با بهره‌گیری از یک رویکرد هندسی (شکل ۳)، آستانه بهینه به صورت داده‌محور تعیین شد. منحنی رابطه‌ی تعداد رخدادها با اندازه خوشه ترسیم گردید و نقطه شکست (Elbow Point) این منحنی به‌عنوان آستانه حداقل اندازه انتخاب شد. براین اساس، خوشه‌هایی با حجم کمتر از ۱۶ وکسل از تحلیل نهایی کنار گذاشته شدند.

همچنین، به منظور افزایش پایداری زمانی و حذف نوسانات گذرا، تمام خوشه‌هایی که صرفاً یک ماه دوام داشتند نیز حذف گردیدند. این پالایش دو سویه مکانی - زمانی، منجر به تمرکز بر خشکسالی‌هایی شد که دارای ساختار فیزیکی منسجم و اهمیت اقلیمی قابل اعتنا بودند. برای هر خوشه باقی‌مانده، مجموعه‌ای از ویژگی‌های ساختاری شامل مدت‌زمان (ماه)، گستره مکانی (به صورت تعداد وکسل یا معادل کیلومترمربع)، شدت میانگین و بیشینه شاخص خود تنظیم پالمر، مرکز هندسی (Centroid) و حجم خشکسالی (Voxel-Month) محاسبه شد. این شاخص‌ها نه تنها در تحلیل رفتار خشکسالی‌های منفرد، بلکه در ارزیابی پویایی مکانی و شناسایی رژیم‌های غالب خشکسالی در مقاطع زمانی مختلف مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت، به منظور درک بهتر از الگوی زمینه‌ای خشکسالی، میانگین بلندمدت شاخص خودتنظیم پالمر در کل دوره مطالعه برای هر پیکسل محاسبه شد و نقشه توزیع فضایی آن به‌عنوان لایه مرجع تولید گردید. این نقشه، تصویر دقیقی از نواحی مزمن خشک و مرطوب کشور ارائه داده و مبنای تفسیر رفتار مکانی خوشه‌ها و مسیرهای خشکسالی در سال‌های مختلف قرار گرفت.

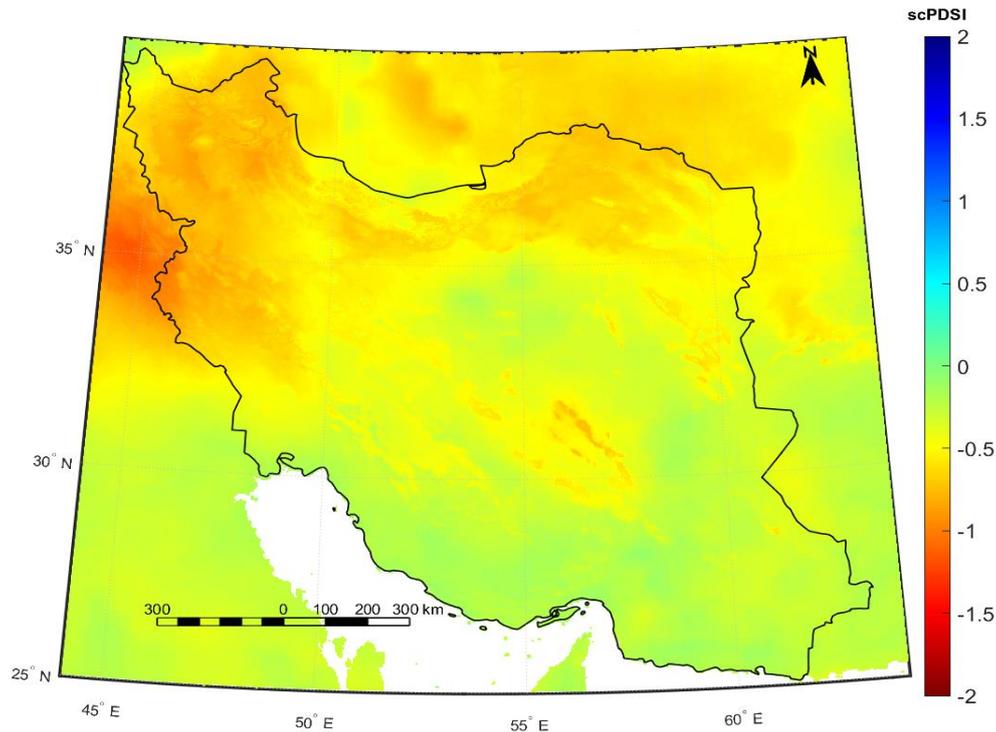


شکل ۳- شماتیک روش محاسبه فیلتر بهینه اندازه خوشه زاویه C با استفاده از اضلاع a، b و c مثلثی که از سه نقطه متوالی روی منحنی تشکیل شده، محاسبه می‌شود (نمای بزرگ‌نمایی شده)

Fig.3. Scheme of the method used to calculate the optimal cluster size filter. Angle C was calculated using the sides a, b, and c of the triangle formed by the three subsequent points (zoomed-in view) (Diaz et al., 2024).

نتایج و بحث

به‌منظور ارائه تصویری کلان از الگوهای بلندمدت خشکسالی، میانگین زمانی شاخص خودتنظیم پالمر برای کل ایران طی بازه ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ محاسبه گردید (شکل ۴). نتایج این نقشه نشان می‌دهد که بخش‌های گسترده‌ای از نیمه غربی، شمال غرب، مناطق مرکزی و ارتفاعات زاگرس دارای مقادیر منفی شاخص بوده‌اند. این مقادیر منفی، بیانگر غلبه شرایط خشکسالی مزمن در این نواحی در طی بیش از شش دهه گذشته است. در مقابل، بخش‌هایی از جنوب شرقی کشور، حوضه هامون، و نوار جنوبی، در مقایسه با سایر نواحی، دارای مقادیر نزدیک به صفر یا اندکی مثبت‌اند که بیانگر شرایط رطوبتی نسبتاً متعادل یا حتی مرطوب در برخی دوره‌ها بوده است. این تفاوت‌های فضایی در میانگین بلندمدت شاخص، احتمالاً بازتاب‌دهنده ترکیبی از عوامل اقلیمی، توپوگرافیک و چرخه‌های هیدرولوژیکی منطقه‌ای است. به‌طور کلی، این نقشه، زمینه مناسبی برای تحلیل ساختارهای زمانی-مکانی خشکسالی در ایران فراهم می‌سازد و تأکید می‌کند که مخاطره خشکسالی در کشور نه تنها یک پدیده موقتی، بلکه یک ویژگی مزمن و نهادینه‌شده در بسیاری از مناطق محسوب می‌شود.



شکل ۴- میانگین بلندمدت شاخص شدت خشکسالی پالمر خودتنظیم (scPDSI) در ایران طی دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲
Fig. 4. Spatial distribution of the long-term mean scPDSI in Iran from 1958 to 2022

تحلیل ساختار خوشه‌های خشکسالی در ایران با استفاده از شاخص خودتنظیم پالمر در دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ نشان داد که ویژگی‌های زمانی و مکانی رخدادها به شدت وابسته به آستانه شاخص و فیلتر اندازه خوشه هستند. نمودارهای ارائه شده در اشکال ۵ تا ۸ نمایی جامع از ساختار و پویایی خوشه‌های خشکسالی در ایران طی سال‌های ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ ارائه می‌دهند. این نمودارهای پراکندگی، ویژگی‌های فضایی - زمانی رخدادهای خشکسالی را در بازه‌ای از آستانه‌های شاخص شدت خشکسالی (scPDSI) از ۰٫۵ تا -۴) و فیلترهای مختلف اندازه خوشه (از صفر تا ۱۰۰ وکسل) به تصویر می‌کشند. تفسیر دقیق این الگوها برای درک هندسه خشکسالی‌ها و پالایش رخدادهای معنادار ضروری است.

در شکل ۵، مجموعه اولیه داده‌ها بدون هیچ‌گونه فیلتر یا حذف، ارائه شده‌اند. در این حالت، به‌ویژه در آستانه‌های ملایم مانند ۰٫۵- و ۱-، تعداد زیادی خوشه شناسایی شده‌اند که عمدتاً کوتاه‌مدت و با وسعت مکانی محدود هستند. برای نمونه، در آستانه ۰٫۵- و بدون فیلتر، بیش از ۷۴۵۴ خوشه شناسایی شده است، در حالی که در آستانه شدیدتر ۴-، تنها ۱۱۰۳ خوشه باقی‌مانده‌اند. این کاهش چشمگیر بیانگر نقش تعیین‌کننده آستانه در کنترل فراوانی و افزایش معناداری فیزیکی داده‌هاست. اعمال فیلتر ساختاری بر مبنای اندازه خوشه، بهبود قابل توجهی در کیفیت ساختاری رخدادها ایجاد کرده است. برای مثال، در همان آستانه ۰٫۵-، با افزایش حداقل اندازه خوشه به ۱۰۰ وکسل، تعداد رخدادها به طور چشمگیری از ۷۴۵۴ به ۳۲۷ کاهش یافته است. این روند پالایش در تمامی آستانه‌ها مشاهده می‌شود و نشان می‌دهد که فیلترگذاری ساختاری می‌تواند به حذف نویزهای گذرا و افزایش انسجام فضایی - زمانی خوشه‌ها بینجامد.

در شکل ۶، با حذف سیستماتیک خوشه‌های یک‌ماهه، گامی مؤثر در جهت حذف نوسانات گذرا و تمرکز بر خشکسالی‌های ساختارمند برداشته شده است. حتی در آستانه‌های شدید مانند ۲- و ۳-، هرچند تعداد خوشه‌ها کاهش یافته، اما پایداری زمانی و انسجام فضایی رخدادهای باقی‌مانده افزایش یافته است. این ویژگی، زمینه مناسبی برای تحلیل‌های دینامیکی نظیر مسیر انتشار و شناسایی مرکز ثقل فراهم می‌کند.

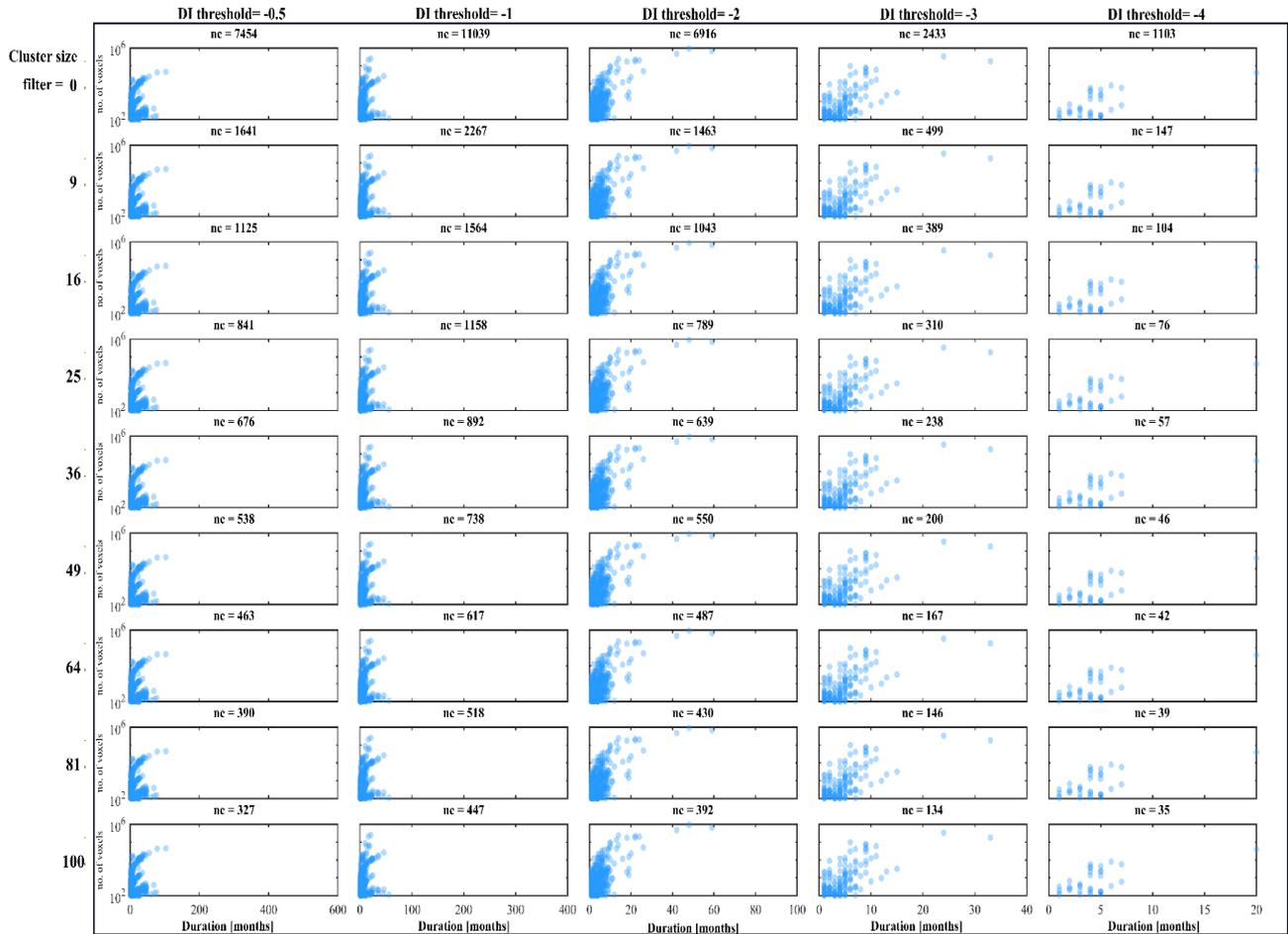
شکل ۷، با تمرکز بر خوشه‌هایی با طول عمر بین ۲ تا ۲۴ ماه، بازه‌ای از خشکسالی‌های کوتاه تا میان‌مدت را پوشش می‌دهد که به‌ویژه در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی و منابع آب، اهمیت بالایی دارند. تحلیل این بازه نشان می‌دهد که حتی در بازه‌های زمانی نسبتاً کوتاه، برخی خوشه‌ها از وسعت مکانی قابل توجهی برخوردار بوده‌اند و نیازمند توجه راهبردی هستند.

در شکل ۸، با ترکیب پالایش زمانی (حذف خوشه‌های یک‌ماهه) و فیلتر ساختاری (تا سقف ۲۴ ماه)، مجموعه‌ای غربال‌شده از رخدادهای پایدار و قابل تکرار ارائه شده است. این ساختار نهایی، هم از نظر تعداد و هم از نظر الگوی فضایی و تداوم زمانی، نمایانگر خوشه‌های معنادار و قابل اتکا برای تحلیل‌های پیشرفته‌تر است. در این میان، آستانه ۲- به‌عنوان سطحی بهینه ظاهر شده است که تعادل مناسبی میان فراوانی رخداد، انسجام ساختاری، و پوشش فضایی برقرار می‌سازد.

تحلیل مقایسه‌ای اشکال ۵ تا ۸ نشان می‌دهد که میان تداوم زمانی خوشه‌های خشکسالی و وسعت مکانی آن‌ها، رابطه‌ای مثبت و نسبتاً پایدار وجود دارد. رخدادهای کوتاه‌مدت (۱ تا ۵ ماه) عمدتاً در مقیاس ده‌ها تا صدها وکسل ظاهر شده‌اند، درحالی‌که خوشه‌هایی با طول عمر بیش از ۱۰ ماه، گاه تا صدها هزار وکسل را دربرگرفته‌اند. این همبستگی در آستانه‌های میانی نظیر ۱- و ۲- برجسته‌تر است و نشان می‌دهد که خشکسالی‌های پایدار، تمایل بیشتری به گسترش فضایی دارند.

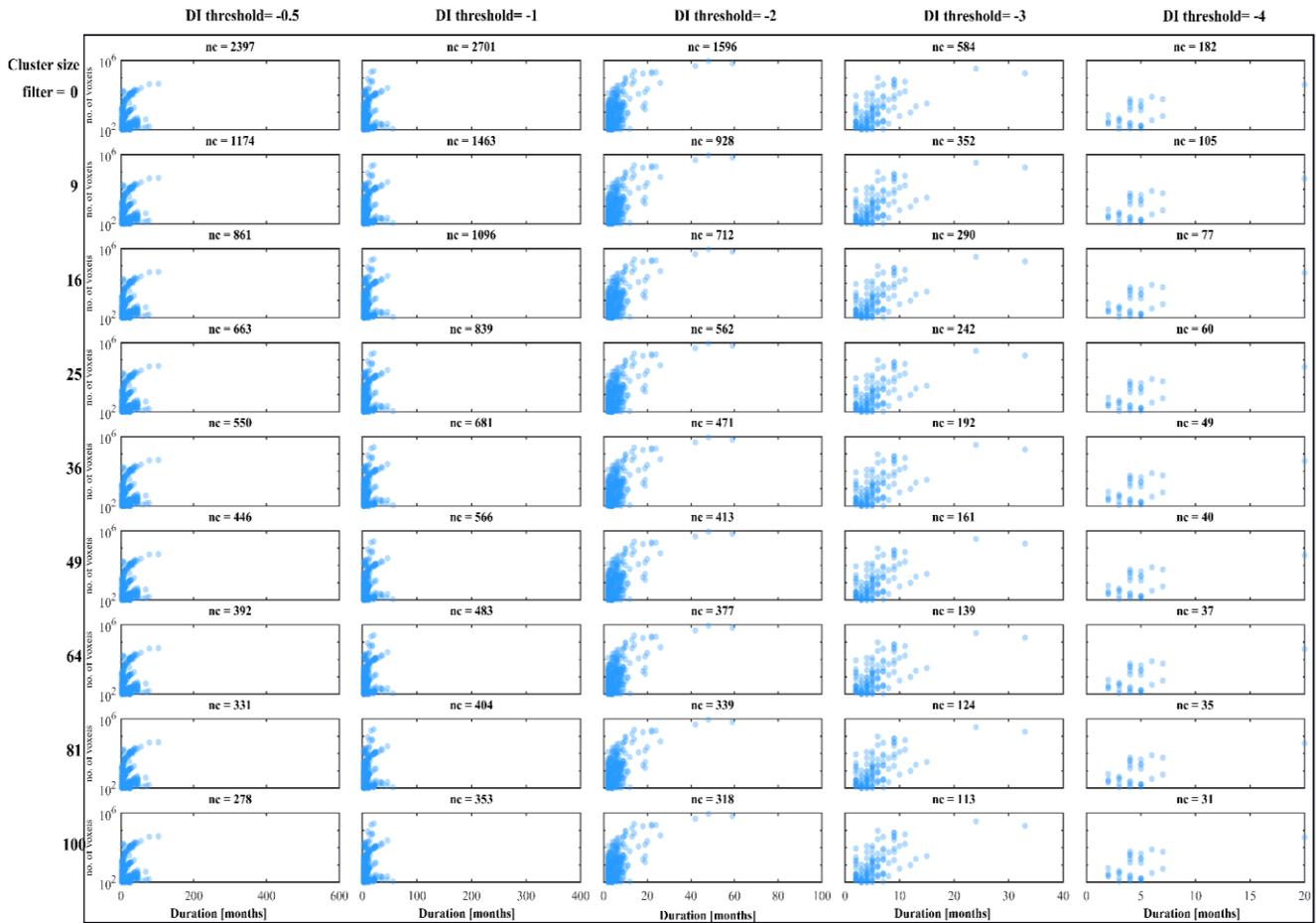
در آستانه‌های بسیار شدید مانند ۴-، هرچند اغلب خوشه‌ها از نظر زمانی کوتاه‌مدت هستند، اما وسعت مکانی برخی از آن‌ها چشمگیر است. این امر می‌تواند ناشی از رخدادهای خشکسالی بسیار شدید و متمرکز باشد که با وجود مدت‌زمان کوتاه، آثار سنگینی در مقیاس محلی یا ناحیه‌ای بر جای می‌گذارند.

یافته‌ها نشان می‌دهند که انتخاب هم‌زمان و داده‌محور آستانه شاخص و فیلتر ساختاری، شرط ضروری برای پالایش خوشه‌های خشکسالی و افزایش اعتبار تحلیل‌هاست. این رویکرد امکان تمرکز بر رخدادهای بحرانی و پرتکرار را در تحلیل‌های پیشرفته‌ای چون ردیابی مرکز ثقل و مسیرهای خطر فراهم می‌سازد.



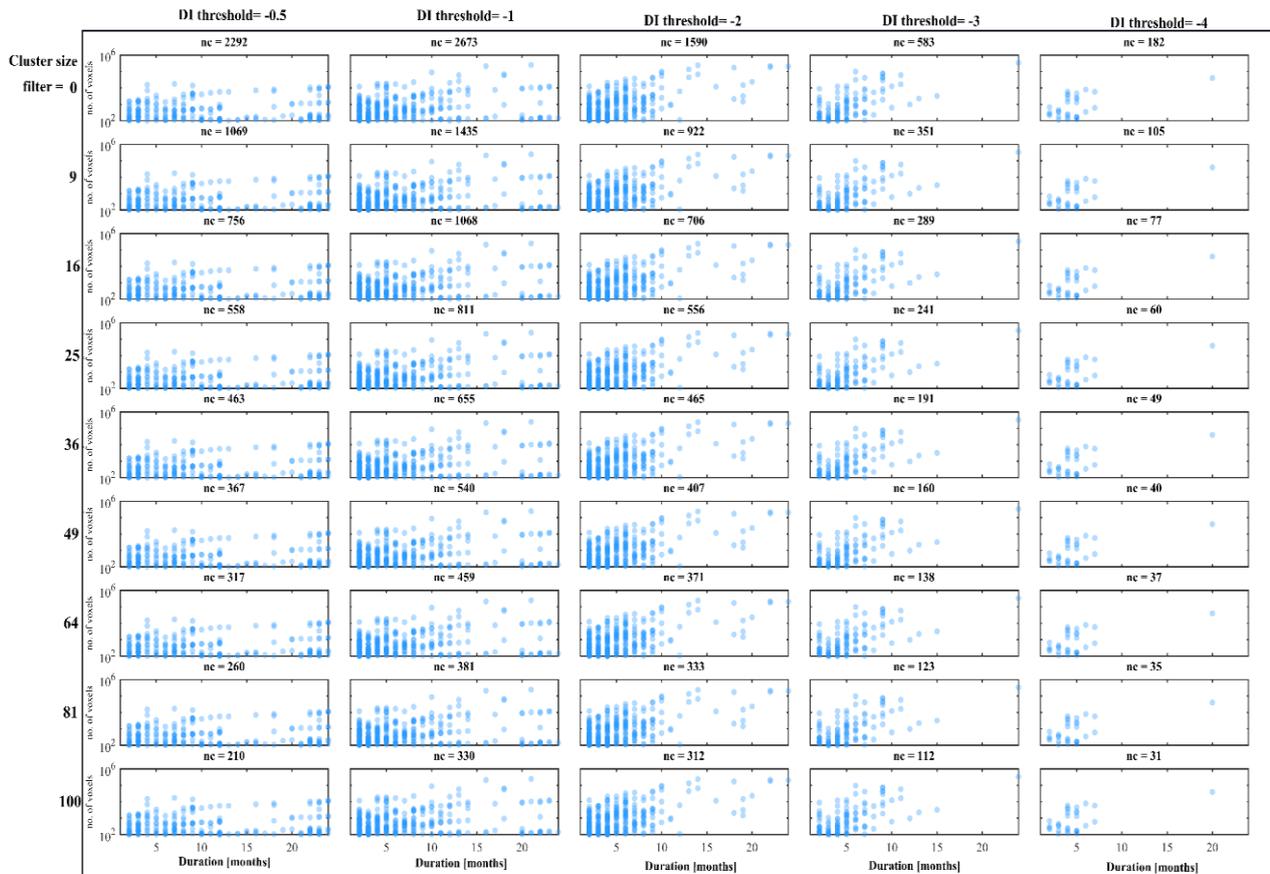
شکل ۵- تعداد خوشه‌ها (nc)، مدت زمان (بر حسب ماه) و بزرگی مکانی (بر حسب تعداد وکسل‌ها) برای تمام آستانه‌های scPDSI (از ۰.۵- تا -۴) و فیلترهای حداقل اندازه خوشه (از ۰ تا ۱۰۰ وکسل) نشان داده شده‌اند. این نمودار شامل خوشه‌هایی با تمام مدت‌ها و بزرگی‌ها است.

Fig.5. The number of clusters (nc), duration (in months), and spatial magnitude (number of voxels) are shown for all thresholds (-0.5 to -4.0) and minimum cluster size filters (0-100 voxels). This includes clusters of all durations and magnitudes.



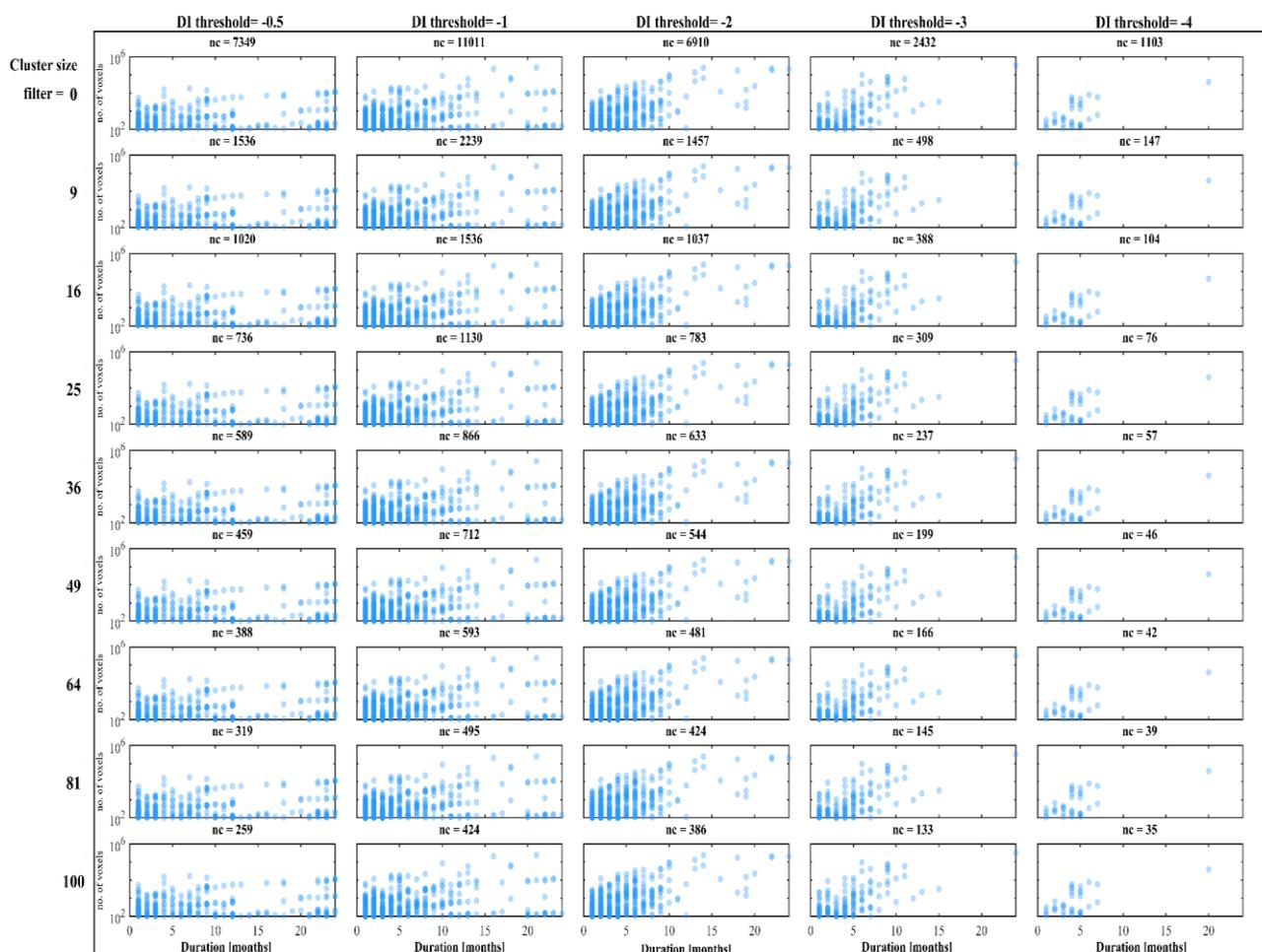
شکل ۶- توزیع پالایش شده خوشه‌های خشکسالی سه بعدی با حذف رخداد‌های یک‌ماهه. تنها خوشه‌هایی که حداقل دو ماه تداوم داشته‌اند نمایش داده شده‌اند تا ساختارهای پایدار خشکسالی را در دامنه‌ای از آستانه‌های scPDSI و مقادیر فیلتر اندازه‌ی خوشه برجسته سازند. خوشه‌های یک‌ماهه به منظور حذف ناهنجاری‌های کوتاه‌مدت از تحلیل کنار گذاشته شده‌اند.

Fig.6. Filtered distribution of 3D drought clusters, excluding one-month events. Drought clusters of at least two months in duration were presented, highlighting persistent drought structures across the range of scPDSI thresholds and filter values. One-month clusters were removed to eliminate short-lived anomalies.



شکل ۷- ساختار مدت - بزرگی خوشه‌های خشکسالی سه بعدی با مدت کمتر از ۲۴ ماه. این نمودار بر رخداد‌های خشکسالی کوتاه تا میان‌مدت تمرکز دارد و خوشه‌هایی با مدت زمان بین ۲ تا ۲۴ ماه را به تصویر می‌کشد. بزرگی مکانی بر حسب تعداد وکسل بیان شده است که امکان ارزیابی رخداد‌های فشرده اما تأثیرگذار خشکسالی را فراهم می‌سازد.

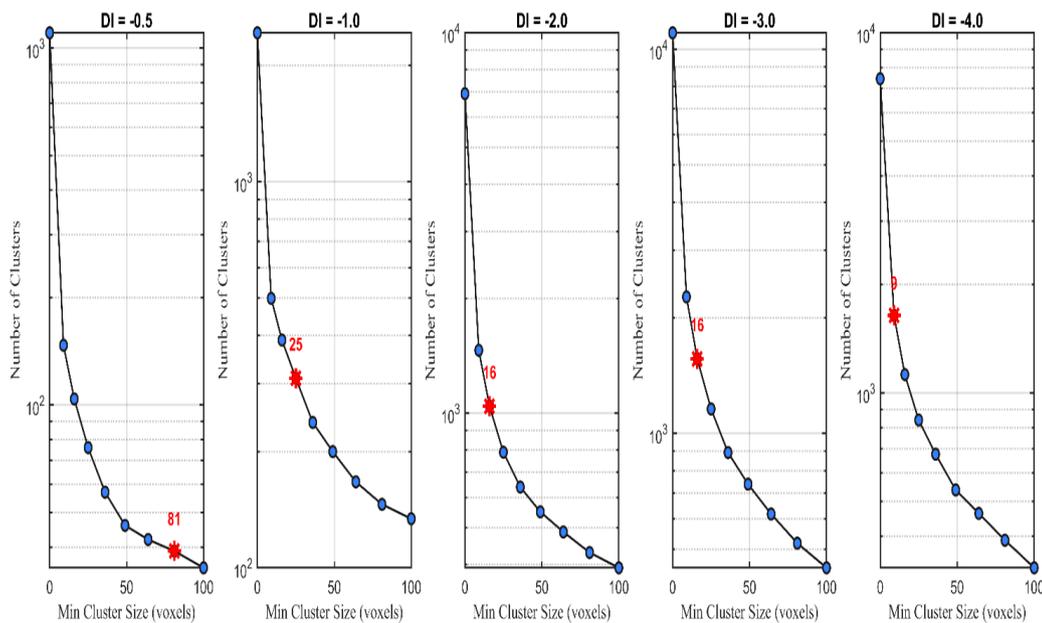
Fig.7. Duration–magnitude structure of 3D drought clusters with durations of less than 24 months. It focuses on short- to medium-duration drought events, visualizing clusters with durations of 2 to 24 months. Spatial magnitude is expressed as the number of voxels, allowing for the assessment of compact yet impactful drought episodes.



شکل ۸- خوشه‌های خشکسالی سه بعدی پالایش شده با مدت زمان بین ۲ تا ۲۴ ماه. این شکل مجموعه نهایی رخداد‌های خشکسالی پالایش شده را نمایش می‌دهد (با حذف خوشه‌های یک‌ماهه و محدود کردن حداکثر مدت زمان به ۲۴ ماه) تا بر خشکسالی‌های کوتاه تا میان مدت تمرکز شود؛ رخدادهایی که احتمال وقوع مجدد آن‌ها در چرخه‌های کشاورزی یا هیدرولوژیکی بالاست.

Fig.8. Filtered 3D drought clusters with durations between 2 and 24 months were used. The final set of filtered drought events—excluding one-month clusters and limiting the maximum duration to 24 months—emphasizes short- to mid-term droughts likely to recur within agricultural or hydrological cycles.

به منظور افزایش دقت در شناسایی خوشه‌های معنادار خشکسالی و حذف ساختارهای ناپایدار و نوفه، در این پژوهش از یک رویکرد داده‌محور مبتنی بر تحلیل هندسی استفاده شد (شکل ۹). این روش، که تحت عنوان زاویه داخلی $\cos C$ شناخته می‌شود، بر پایه‌ی انحنا منحنی «تعداد خوشه‌ها در برابر آستانه اندازه خوشه» عمل می‌کند. با محاسبه زاویه بین نقاط متوالی در این منحنی، نقطه‌ای که بیشترین انحنا (نقطه عطف) را نشان می‌دهد به عنوان مقدار بهینه فیلتر خوشه تعیین می‌گردد. اجرای این روش در پنج سطح مختلف از شاخص (از -0.5 تا -4) نشان داد که در آستانه -2 ، مقدار بهینه برای فیلتر اندازه خوشه برابر با 16 وکسل است. این نقطه نشان‌دهنده گذار از خوشه‌های کوتاه‌مدت و کوچک‌مقیاس به رخدادهایی با پایداری زمانی و ساختار هیدرولوژیکی معنادار است. اعمال این فیلتر 16 وکسلی منجر به پالایش قابل توجه مجموعه داده‌ها شد، به گونه‌ای که ضمن حذف ناهنجاری‌های ساختاری و نویزهای آماری، انسجام مکانی-زمانی خوشه‌های خشکسالی افزایش یافت. این مرحله از پالایش، بنیانی مطمئن برای انجام تحلیل‌های پیشرفته‌تری همچون بررسی روندهای زمانی، رفتار انتشار مکانی و شناسایی الگوهای اقلیمی فراهم ساخت.

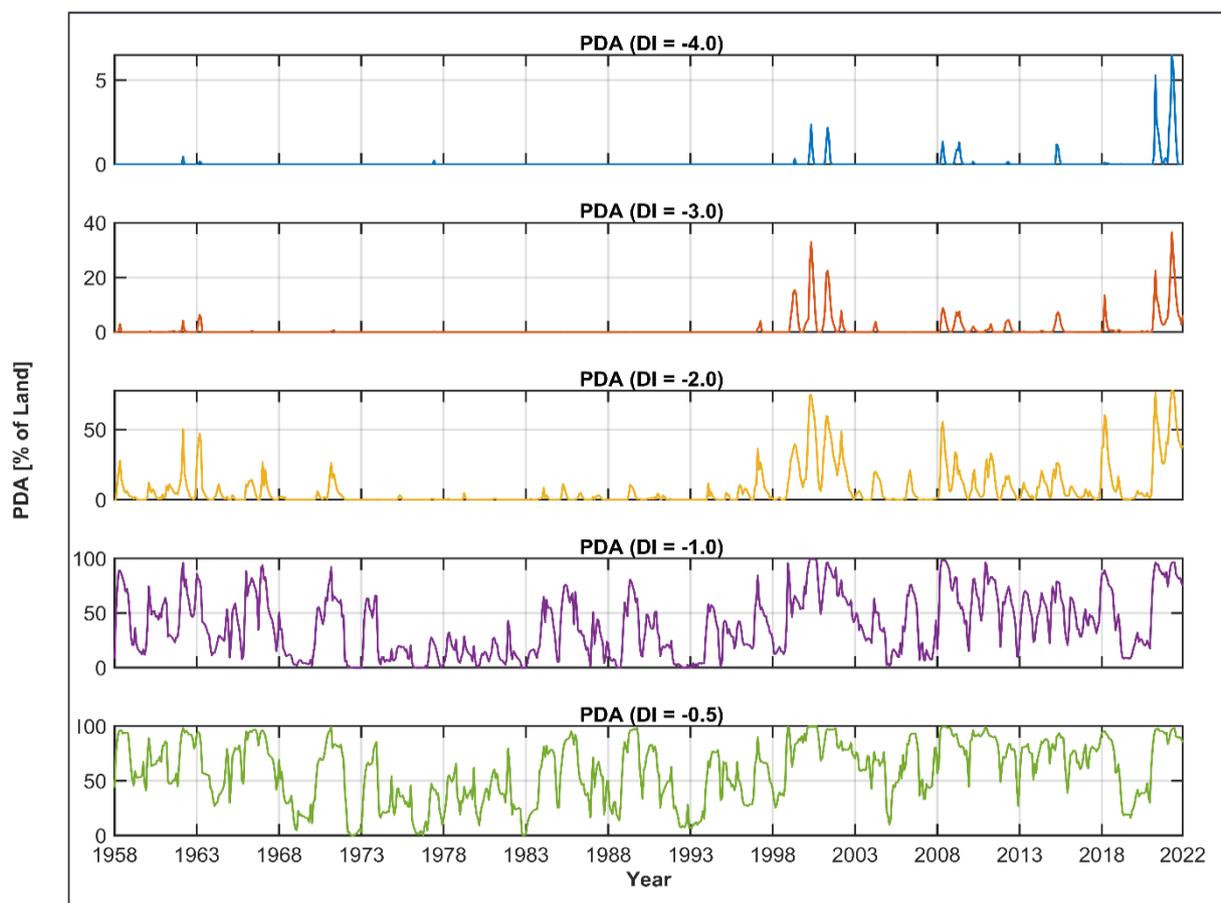


شکل ۹- شناسایی اندازه بهینه فیلتر پالایش خوشه‌ها

Fig.9. Identification of optimal cleaning filter size

شکل ۱۰ روند تغییرات درصد ناحیه تحت تأثیر خشکسالی (PDA) را در سطح ملی طی سال‌های ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ و در پنج آستانه مختلف شاخص خودتنظیم پالمر نمایش می‌دهد. در آستانه‌های ملایم‌تر (-0.5 و -1)، خشکسالی‌ها تقریباً به صورت مستمر در کشور رخ داده‌اند، به گونه‌ای که در مقاطع متعددی بیش از 40 تا 80 درصد از پهنا سرزمینی ایران درگیر شرایط خشکسالی بوده است. این روند مستمر بازتابی از نوسانات فصلی، بین‌سالی و فشار آبی مزمن در اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران است. در آستانه -2 ، خشکسالی‌های چندساله با شدت متوسط تا زیاد برجسته‌تر شده‌اند و قله‌های قابل توجهی در دوره‌های خاصی مانند اواخر دهه 1960 ، اوایل دهه 1980 و دهه‌ی نخست قرن بیست و یکم (2000 تا 2010) مشاهده می‌شود. این بازه‌ها نمایانگر تنش‌های اقلیمی پیوسته در مقیاس منطقه‌ای هستند که غالباً با آثار اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی همراه بوده‌اند. با شدت یافتن آستانه (-3 و -4)، مساحت تحت تأثیر خشکسالی به‌طور طبیعی کاهش می‌یابد (کمتر از 20 درصد و 5 درصد به ترتیب)، اما هم‌زمان، افزایش بسامد خشکسالی‌های شدید از دهه‌ی 2000 به بعد قابل توجه است. این الگو بیانگر تشدید پدیده‌ی خشکسالی‌های مرکب و شدید در دهه‌های اخیر است و به‌ویژه از دهه‌ی 2000 به بعد، دلالت بر گذار به یک رژیم اقلیمی پایدارتر و مزمن‌تر از خشکسالی دارد؛ وضعیتی که در آن رخدادهای خشکسالی نه تنها شدیدتر، بلکه ساختاریافته‌تر و تکرار شونده‌تر

شده‌اند. نکته‌ی مهم آن است که در تمامی آستانه‌ها، سطح پایه PDA پس از سال ۲۰۰۰، روندی افزایشی نشان می‌دهد، که می‌تواند به‌عنوان نشانه‌ای از گذار به سمت رژیم‌های اقلیمی خشک‌تر و پایدارتر تفسیر شود. این تغییر احتمالاً با پیامدهای تغییر اقلیم، از جمله افزایش دمای هوا، تشدید تبخیر و تعرق، و کاهش ظرفیت ذخیره رطوبت خاک مرتبط است.



شکل ۱۰- سری زمانی درصد ناحیه تحت تأثیر خشکسالی (PDA) در ایران طی دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲

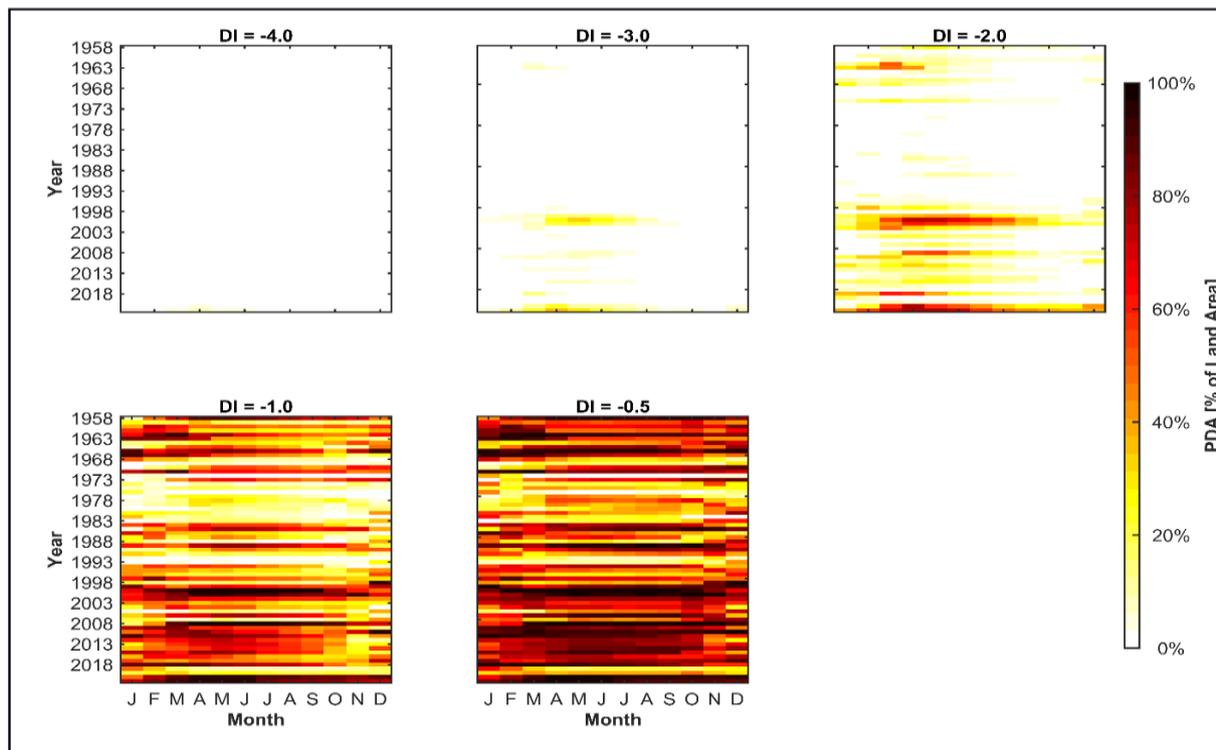
Fig.10. Time series of Percentage Drought-Affected Area (PDA) across Iran from 1958 to 2022

بررسی الگوی ماهانه خشکسالی‌ها در شکل ۱۱، یافته‌های پیشین را تکمیل کرده و شواهد قوی‌تری از گذار ساختاری به رژیم خشکسالی پایدارتر پس از سال ۲۰۰۰ فراهم می‌آورد. به‌ویژه در آستانه‌های ۱- و ۲-، نه‌تنها فراوانی رخدادها افزایش یافته، بلکه الگوی زمانی آن‌ها نیز از نوسانات پراکنده به خوشه‌های فصلی متمرکزتر تغییر یافته است.

شکل ۱۱، نقشه‌های حرارتی ماهانه درصد ناحیه تحت تأثیر خشکسالی را در گستره ایران طی دوره ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ و بر اساس پنج سطح آستانه شاخص خودتنظیم پالمر نمایش می‌دهد. در آستانه‌های خفیف‌تر (۰/۵- و ۱-)، مقادیر PDA در بیشتر سال‌های مطالعه در سطوح بالا و نسبتاً پایدار قرار گرفته‌اند. اوج‌های فصلی در بازه بهار (آوریل تا ژوئن) و اواخر تابستان تا اوایل پاییز (اوت تا اکتبر) به‌وضوح مشاهده می‌شود که بازتاب‌دهنده فعال‌بودن خشکسالی در دوره‌های حساس هیدرولوژیکی، مانند زمان رشد محصولات زراعی و تغذیه منابع آبی سطحی است. با افزایش شدت آستانه (۲- و پایین‌تر)، تعداد ماه‌های خشکسالی کاهش یافته، اما شدت و وسعت رخدادها افزایش یافته است. به‌ویژه در سال‌هایی مانند ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱، قله‌های PDA به‌گونه‌ای شکل گرفته‌اند که در برخی ماه‌ها بیش از ۶۰ درصد کشور درگیر خشکسالی‌های شدید بوده است. این مقاطع زمانی بیانگر بروز خشکسالی‌های فراگیر و چندماهه‌اند که با ساختارهای خشکسالی سه بعدی نیز هم‌راستا است.

در آستانه‌های بسیار شدید (۳- و ۴-)، پوشش خشکسالی به شدت کاهش یافته و به رخدادهایی محدود می‌شود که اغلب ماهیتی پراکنده، منطقه‌ای و مقطعی دارند. با این حال، همین خشکسالی‌های محدود از نظر شدت و اثرگذاری قابل توجه‌اند و عمدتاً در دهه ۲۰۰۰ به بعد تمرکز یافته‌اند.

نکته قابل توجه، روند افزایشی پایه PDA در آستانه‌های میانی (۱- و ۲-) پس از سال ۲۰۰۰ است که نشان‌دهنده افزایش ماندگاری و تکرارپذیری خشکسالی‌ها در ایران طی دهه‌های اخیر است. این روند، با یافته‌های حاصل از تحلیل ساختارهای سه بعدی و پویایی زمانی خشکسالی در این پژوهش کاملاً هم‌راستا بوده و می‌تواند به‌عنوان نشانه‌ای از تغییر رژیم اقلیمی کشور به سمت شرایط خشک‌تر و ناپایدارتر تلقی گردد. در ادامه، ویژگی‌های مکانی - زمانی بررسی شده‌اند.

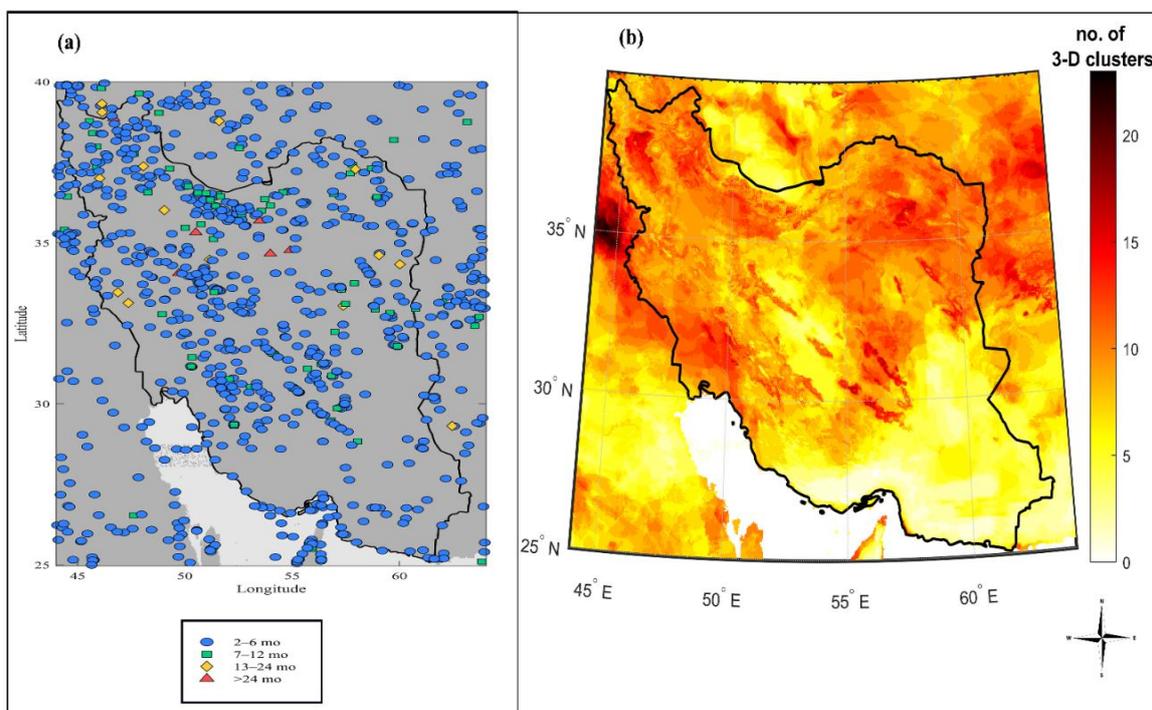


شکل ۱۱- نقشه‌های حرارتی ماهانه درصد ناحیه تحت تأثیر خشکسالی (PDA) در ایران طی دوره‌ی ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲
Fig.11. Monthly heatmaps of Percentage Drought-Affected Area (PDA) across Iran from 1958 to 2022

تحلیل ساختار خشکسالی‌های سه بعدی با بهره‌گیری از آستانه شاخص ۲- و فیلتر بهینه ۱۶ و کسل، چشم‌اندازی دقیق از رفتار فضایی و الگوهای تکرار خشکسالی در ایران طی بازه ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ ترسیم می‌کند (شکل ۱۲).

در بخش (a) از شکل ۱۲، مراکز هندسی خوشه‌های خشکسالی بر مبنای طول مدت رخداد در چهار طبقه زمانی به تصویر کشیده شده‌اند. رخداد‌های کوتاه‌مدت (۲ تا ۶ ماه) در سطح کشور پراکندگی بالایی دارند، به‌ویژه در مناطق مرطوب شمالی و نواحی خشک مرکزی، که این توزیع گسترده بیانگر نوسانات فصلی و بین‌سالی در اقلیم ایران است. در مقابل، خوشه‌های بلندمدت (بیش از ۱۲ ماه) عمدتاً در استان‌های مرکزی، شرقی و غربی از جمله یزد، سمنان، اصفهان، آذربایجان غربی و خراسان‌ها متمرکز هستند. عدم حضور خشکسالی‌های طولانی‌مدت در سواحل جنوبی و نواحی خزری، احتمالاً بازتابی از نقش سامانه‌های تعدیل‌گر اقلیمی همچون دریای خزر و مونسون تابستانی هند است که موجب محدودسازی پایداری خشکسالی در این نواحی شده‌اند.

بخش (b) شکل ۱۲ نیز فراوانی مکانی وقوع خوشه‌های سه بعدی خشکسالی را نشان می‌دهد. بیشترین تکرار (بیش از ۲۰ رخداد) در فلات مرکزی و استان‌هایی نظیر سمنان، یزد، اصفهان، ایلام و آذربایجان غربی مشاهده می‌شود؛ مناطقی که می‌توان آن‌ها را کانون‌های پرتکرار خشکسالی و پرتنش اقلیمی در کشور دانست. در مقابل، نواحی با کمترین نرخ تکرار، عمدتاً در سواحل جنوبی و شمالی کشور واقع‌اند که با ویژگی‌های اقلیم مرطوب یا موسمی آن‌ها مطابقت دارد.



شکل ۱۲- (a) مراکز خوشه‌های خشکسالی سه بعدی شناسایی‌شده در بازه‌ی ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲، دسته‌بندی‌شده بر اساس مدت زمان خوشه [بر حسب ماه]. (b) فراوانی وقوع خوشه‌های خشکسالی در هر سلول شبکه طی دوره‌ی مورد مطالعه.

Fig.12. (a) Centroids of 3-D drought clusters detected from 1958 to 2022, classified by cluster duration [months]. (b) Frequency of cluster occurrence in each grid cell during the study period.

برآیند کلی یافته‌های این پژوهش، تصویری روشن و ساختاریافته از تحول زمانی-فضایی خشکسالی‌های ایران طی بیش از شش دهه گذشته ارائه می‌دهد. از یک‌سو، تحلیل‌های آماری و جغرافیایی گویای آن‌اند که از اوایل دهه ۲۰۰۰ میلادی، رخداد‌های خشکسالی در کشور به‌سوی الگوی شدیدتر، مکررتر و ساختاریافته‌تر میل کرده‌اند؛ الگویی که از نظر مکانی، با تمرکز در نواحی مرکزی، شرقی و شمال غرب کشور و از نظر زمانی، با انسجام و تداوم بیشتر همراه بوده است. از سوی دیگر، چارچوب نوآورانه خوشه‌بندی سه بعدی به‌کاررفته در این پژوهش، امکان تحلیل دقیق‌تری از پویایی خشکسالی‌ها را فراهم ساخت؛ به‌ویژه از منظر تعیین آستانه‌های بهینه، پالایش نویز و شناسایی کانون‌های نوظهور. این روش داده‌محور نه تنها در شناسایی روندهای پنهان اقلیمی مؤثر بوده، بلکه افق‌های نوینی در پایش، هشدار و سیاست‌گذاری اقلیمی کشور گشوده است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با بهره‌گیری از روش خوشه‌بندی سه بعدی و داده‌های اقلیمی با وضوح بالا شاخص خودتنظیم پالمر، تصویری جامع و کم‌نظیر از ساختار، الگوها و تحولات خشکسالی در ایران طی بازه ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۲ ارائه گردید. مهم‌ترین نتایج و دلالت‌های علمی و عملیاتی این پژوهش را می‌توان در چهار محور خلاصه کرد:

الف) گذار به رژیم خشکسالی پایدارتر: از اوایل دهه ۲۰۰۰ میلادی، خشکسالی‌ها در ایران وارد مرحله جدیدی شده است؛ رخداد‌هایی بزرگ‌تر، بادوام‌تر و با فواصل کوتاه‌تر. این دگرگونی ساختاری، نشانه‌ای از هم‌زمانی اثرات تغییر اقلیم جهانی و نوسانات

منطقه‌ای مانند ENSO یا کاهش پوشش برف زمستانی است، استمرار این رخدادها تهدیدی مضاعف برای منابع آب زیرزمینی، امنیت غذایی و تعادل بوم نظام‌ها محسوب می‌شود (Madani, 2014).

ب) تعیین آستانه بهینه و خوشه‌های معنادار: تحلیل حساسیت به آستانه‌های مختلف شاخص خودتنظیم پالمر نشان داد که آستانه ۲- در کنار فیلتر هندسی ۱۶ و کسل، تعادلی منطقی میان حساسیت و دقت فراهم می‌کند. این نوآوری نه تنها از حذف نوفه‌های فضایی جلوگیری کرد بلکه تحلیل‌ها را به سمت خشکسالی‌های واقعی، فیزیکی و ساختاری هدایت کرد (Pyarali et al., 2022; Diaz et al., 2024).

ج) بازبیکربندی فضایی و کانون‌های جدید خشکسالی: توزیع مکانی خشکسالی‌های شناسایی شده بیانگر آن است که اگرچه نواحی خشک سنتی (مرکز و جنوب شرق) همچنان در معرض بیشترین خشکسالی‌ها هستند، اما مناطق دیگری نیز به نقشه خطر افزوده شده‌اند. در دو دهه اخیر، مناطق مرکزی، غربی، شمال شرقی و شمال غربی ایران به کانون‌های تازه خشکسالی‌های شدید بدل شده‌اند؛ مناطقی که پیش‌تر کمتر دچار خشکسالی‌های طولانی می‌شدند. این تغییر الگوی فضایی حاکی از آن است که اثرات خشکسالی در کشور گسترده‌تر شده و بسیاری از استان‌ها که شاید در گذشته مشکل کم‌آبی حاد نداشتند، اکنون با تهدید خشکسالی‌های پیاپی روبرو هستند. چنین یافته‌ای بر ضرورت بازنگری در برنامه‌های سازگاری اقلیمی و مدیریت منابع آب در سطح ملی تأکید دارد، به نحوی که تمامی مناطق درگیر را پوشش دهد.

د) اعتبار و ظرفیت چارچوب سه بعدی در پیش‌بینی و هشدار: این مطالعه نشان داد که خوشه‌بندی سه بعدی خشکسالی نه تنها برای پیش‌گذشته، بلکه برای پیش‌بینی مسیر گسترش خشکسالی‌ها نیز ابزاری توانمند است. توسعه آتی این چارچوب شامل تحلیل سرعت و شتاب خوشه‌ها، ترکیب با شاخص‌های چندمتغیره و اتصال به پایگاه‌های خسارات اقتصادی می‌تواند افق‌های نوینی در مدیریت سازگار با تغییر اقلیم بگشاید (Shayeghi et al., 2024).

در مجموع، یافته‌های این پژوهش بر لزوم تغییر رویکرد حکمرانی اقلیمی در ایران تأکید دارند؛ از مدیریت واکنشی به برنامه‌ریزی پیش‌نگر، از تحلیل ایستا به تحلیل پویای خشکسالی، و از مداخلات محلی به راهبردهای شبکه‌ای و منطقه‌ای. امید است با بهره‌گیری از این چارچوب علمی، سیاست‌گذاری خشکسالی در کشور وارد مرحله‌ای کارآمدتر، منسجم‌تر و راهبردی‌تر قرار گیرد.

References

- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, 5, 170191. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- Alayi Talaghani, M. (2009). *Geomorphology of Iran*. Tehran: Ghoomes Publications. [In Persian]
- Andreadis, K. M., Clark, E. A., Wood, A. W., Hamlet, A. F., & Lettenmaier, D. P. (2005). Twentieth-century drought in the conterminous United States. *Journal of Hydrometeorology*, 6(6), 985-1001. <https://doi.org/10.1175/JHM450.1>
- Araghi, A. R., Martinez, C. J., & Adamowski, J. F. (2023). Evaluation of TerraClimate gridded data across diverse climates in Iran. *Earth Science Informatics*, 16, 1347–1358. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-00967-z>
- Beck, H. E., Wood, E. F., Pan, M., Fisher, C. K., Miralles, D. G., Van Dijk, A. I.,... & Adler, R. F. (2019). MSWEP V2 global 3-hourly 0.1 precipitation: methodology and quantitative assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(3), 473-500. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0138.1>
- Cook, B. I., Ault, T. R., & Smerdon, J. E. (2015). Unprecedented 21st century drought risk in the American Southwest and Central Plains. *Science advances*, 1(1), e1400082. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400082>
- Diaz, V., Corzo Perez, G. A., Van Lanen, H. A. J., & Solomatine, D. P. (2024). Three-Dimensional Clustering in the Characterization of Spatiotemporal Drought Dynamics: Cluster Size Filter and Drought Indicator Threshold Optimization. *Advanced Hydroinformatics: Machine Learning and Optimization for Water Resources*, 319-342. <https://doi.org/10.1002/9781119639268.ch11>
- Diaz, V., Perez, G. A. C., Van Lanen, H. A., Solomatine, D., & Varouchakis, E. A. (2020). An approach to characterise spatio-temporal drought dynamics. *Advances in Water Resources*, 137, 103512. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103512>

- Fathi Taperasht, A., Shafizadeh-Moghadam, H., & Kouchakzadeh, M. (2022). Spatial-temporal analysis of Iran's climatic classification based on Domarten method and Mann-Kendall test in the statistical period of 1995-2019. *Environmental Sciences*, 20(3), 137-154. [In Persian] <https://doi.org/10.52547/envs.2021.1105>
- Forootan, E., Safari, A., Mostafaie, A., Schumacher, M., Delavar, M., & Awange, J. L. (2017). Large-scale total water storage and water flux changes over the arid and semiarid parts of the Middle East from GRACE and reanalysis products. *Surveys in Geophysics*, 38(3), 591-615. [In Persian] <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9403-1>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations – A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gebrechorkos, S. H., Hülsmann, S., & Bernhofer, C. (2019). Long-term trends in rainfall and temperature using high-resolution climate datasets in East Africa. *Scientific Reports* 9, 11376. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47933-8>
- Haralick, R. M., & Shapiro, L. G. (1992). *Computer and robot vision II*. Addison-Wesley.
- Herrera-Estrada, J. E., & Diffenbaugh, N. S. (2020). Landfalling droughts: Global tracking of moisture deficits from the oceans onto land. *Water Resources Research*, 56(9), e2019WR026877. <https://doi.org/10.1029/2019WR026877>
- Hosseini, A., Ghavidel, Y., & Farajzadeh, M. (2021). Characterization of drought dynamics in Iran by using S-TRACK method. *Theoretical and Applied Climatology*, 145, 661–671. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03656-3>
- Khosravi, M., Abbasnia, M., Ghobadi, A., & Armesh, M. (2017). Investigating the spatial relationship between spring convective precipitation and topography in northwestern Iran. *Geography and Urban-Regional Planning*, 7(23), 21–38. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/gaij.2017.3222>
- Lloyd-Hughes, B. (2012). A spatio-temporal structure-based approach to drought characterization. *International Journal of Climatology*, 32(3), 406–418. <https://doi.org/10.1002/joc.2280>
- Liu, Z., Hu, S., & Mo, X. (2025). Spatiotemporal Variation of Compound Drought and Heatwave Events in Semi-Arid and Semi-Humid Regions of China. *Atmosphere*, 16(5), 568. <https://doi.org/10.3390/atmos16050568>
- Madani, K. (2014). Water management in Iran: What is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(4), 315–328. <https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z>
- Najafi, M. S., & Alizadeh, O. (2023). Climate zones in Iran. *Meteorological Applications*, 30(5), e2147. <https://doi.org/10.1002/met.2147>
- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological drought* (Research Paper 45). U.S. Weather Bureau.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Pyarali, K., Peng, J., Disse, M., & Tuo, Y. (2022). Development and application of high resolution SPEI drought dataset for Central Asia. *Scientific Data*, 9(1), 172. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01279-5>
- Razmi, R., Sotoudeh, F., Ghane, M., & Ostad-Ali-Askari, K. (2022). Temporal-spatial analysis of drought and wet periods: case study of a wet region in Northwestern Iran (East Azerbaijan, West Azerbaijan, Ardebil and Zanjan provinces). *Applied Water Science*, 12(11), 251. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01765-6>
- Sadeghi, F., Ghavidel, Y., & Farajzadeh, M. (2022). Long-term analysis of the spatiotemporal standardized precipitation evapotranspiration index for West Asia. *Arabian Journal of Geosciences*, 15, 1183. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10458-y>
- Shayeghi, A., Ziveh, A. R., Bakhtar, A., Teymouri, J., Hanel, M., Godoy, M. R. V., ... & AghaKouchak, A. (2024). Assessing drought impacts on groundwater and agriculture in Iran using high-resolution precipitation and evapotranspiration products. *Journal of Hydrology*, 631, 130828. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130828>
- Sheffield, J., Wood, E., & Roderick, M. (2012). Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 491, 435–438. <https://doi.org/10.1038/nature11575>
- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific Reports*, 9(1), 1464. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38071-8>
- Verhoeven, E., Wardle, G. M., Roth, G. W., & Greenville, A. C. (2022). Characterising the spatiotemporal dynamics of drought and wet events in Australia. *Science of the Total Environment*, 846, 157480. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157480>
- Vernieuwe, H., De Baets, B., & Verhoest, N. E. (2020). A mathematical morphology approach for a qualitative exploration of drought events in space and time. *International Journal of Climatology*, 40(1), 530-543. <https://doi.org/10.1002/joc.6226>

- Wang, D., Jia, H., Tang, J., & Liu, N. (2025). Analysis of the spatiotemporal patterns and propagation characteristics of drought risk in China. *Frontiers of Earth Science*, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11707-024-1139-5>
- Wei, W., Lu, D., Song, Y., Sherif, M., Dewan, A., Liu, T & Wang, X. (2025). Spatiotemporal characteristics of drought events in Asia from a three-dimensional perspective. *Climate Dynamics*, 63(3), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s00382-025-07645-4>
- Wells, N., Goddard, S., & Hayes, M. J. (2004). A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of Climate*, 17(12), 2335–2351. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017%3C2335:ASPDSI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017%3C2335:ASPDSI%3E2.0.CO;2)
- World Meteorological Organization (WMO). (2006). *Drought monitoring and early warning: Concepts, progress and future challenges* (WMO No. 1006). Geneva: WMO
- Yang, G., Chang, J., Wang, Y., Guo, A., Zhang, L., Zhou, K., & Wang, Z. (2024). Understanding drought propagation through coupling spatiotemporal features using vine copulas: A compound drought perspective. *Science of the Total Environment*, 921, 171080. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171080>



Forecasting and Trending of Precipitation in Selected Cities of the Northern Half of Iran Using ACCESS and CNRM Models

Roghayeh Maleki Meresht¹, Bromand Salahi^{2*}, Mahnaz Saber³

^{1&3} Postdoctoral Researcher, Department of Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

² Professor, Department of Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History

Received: 16 April 2025

Revised: 16 June 2025

Accepted: 10 July 2025

Available Online: 10 July 2025

Keywords:

Climate Change

Precipitation Trends

Mann-Kendall Test

Climate Downscaling

Northern Iran

Climate change has led to alterations in the temporal and spatial distribution of precipitation across the globe. The present study aims to identify trends and project future precipitation in selected cities of northern Iran. To achieve this goal, the 30-year precipitation trend (1994–2023) for each city was first examined using the Mann-Kendall test and Sen's slope estimator. In the second phase, precipitation was projected for the next 20 years (2040–2060) in the study area using the latest version of the LARS-WG8 weather generator under two scenarios—SSP2-4.5 and SSP5-8.5—with the ACCESS-ESM1-5 and CNRM-CM6-1 models. The outputs of both models were then evaluated and compared using validation indices (R^2 , MAPE, and RMSE) to select the most suitable model. Trend analysis results indicated that over the past 30 years (1994–2023), the precipitation pattern in all stations in the region changed significantly, showing a decreasing trend at the 99% confidence level. This decrease was greater in the cities of Qazvin, Ardabil, and Zanjan, and less in Rasht and Gorgan. According to the projections from the two models, ACCESS-ESM1-5 and CNRM-CM6, over the next 20 years (2040–2060), the entire study area will face a decrease in precipitation in most months of the year. The decrease in precipitation in the northwest will be more than 60% in some months. Conversely, some cities will experience an increase in precipitation during the warm seasons, which will be more evident in low-precipitation cities such as Semnan. Finally, the comparison of the total annual precipitation of the observed and forecast periods confirmed a significant decrease in precipitation across the entire study area compared to the base period. The research findings indicate temporal and spatial anomalies in precipitation, confirm the effects of climate change on the region, and emphasize the need to adopt efficient management policies to optimize water resource consumption and develop strategies for adapting to climate change.

* Corresponding author: Dr. Bromand Salahi

E-mail address: salahi@uma.ac.ir

How to cite this article: Maleki Meresht, R., Salahi, B., & Saber, M. (2025). Forecasting and Trending of Precipitation in Selected Cities of the Northern Half of Iran Using ACCESS and CNRM Models. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 116-139. <https://doi.org/10.22067/geoeH.2025.93054.1565>



©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 has altered the temporal and spatial distribution of precipitation and its intensity throughout the world. Precipitation description, analysis, and modeling are among the most challenging issues in climate research, reflecting its complex and irregular temporal and spatial structure. In this regard, several modeling methods have been developed to deal with this complexity (Sánchez et al., 2011). A reduction in the number of rainy days and an increase in precipitation intensity over limited days can increase the probability of flooding in areas such as the coastal cities of the Caspian Sea, as well as cause soil erosion and reduce water infiltration into groundwater resources.

Material and Methods

In the present study, the trend and forecast of precipitation in selected cities in northern Iran (Ardabil, Tabriz, Bojnourd, Mashhad, Gorgan, Semnan, Zanjan, Tehran, Urmia, Gorgan, Rasht and, Sanandaj) were investigated. To analyze the total annual precipitation, data from the last 30 years (1994–2023) were obtained from the Iranian Meteorological Organization, and Sen's slope estimator, a non-parametric method for estimating the slope of the regression line in trend analysis, was applied. This test includes the following steps:

$$Qi = \frac{X_t - X_s}{t - s}, i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

Where x_t and x_s are the data at times $t > s$ and $N = (n(n-1))/2$, respectively.

$$C\alpha = Z_{1-\frac{\alpha}{2}} = \sqrt{Var(A)} \quad (2)$$

In the above equation, Z is the quantile of the standard normal distribution (Salmi et al, 2002).

$$M1 = \frac{N - C\alpha}{2} \quad (3)$$
$$M2 = \frac{N + C\alpha}{2}$$

Where N is the number of slopes calculated in section a.

To determine the significance of the trend, the Mann-Kendall test was used. In this test, the null hypothesis indicates randomness and the absence of a trend. In this method, first the difference between each observation and all subsequent observations is calculated and the parameter S is obtained based on equation (4):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (4)$$

In the above equation n is the number of observations in the series X_j and X_k are the k th and j th data of the series, respectively.

Next step, the variance s was calculated using equation (5).

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

Where n is the number of sequences in which at least one data is repeated. Finally, the z statistic was obtained based on equation (6).

$$S = \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} \quad (6)$$

Assuming two ranges of the trend test, the null hypothesis is accepted if the following condition (relation 7) holds:

$$|Z| < Z_{\alpha/2} \quad (7)$$

In the above relationship, Z is the significance level and Z_{α} is the standard normal distribution statistic at the significance level. In the present study, this test was applied at both the 99% and 95% confidence levels, and if the Z statistic is positive, the trend of the data series is upward and if it is negative, the trend is downward.

In order to examine the confidence limits, in equation (1), which is arranged from small to large, $M1$ th and $M2+1$ th slopes are obtained. If the number zero is in the range between the two obtained slopes, the null hypothesis is confirmed and the time series is without trend (ghorbani et al, 2012). In the next part of the research, in order to predict future precipitation, first the base period data during the years (1980-2010) were simulated in the LARS-WG8 microcomputer. Then, the precipitation forecast for the next 20 years (years 2041 to 2060) was carried out using the two ACCESS-ESM1-5 and CNRM-CM6-1 models under the scenarios (SSP2-4.5) and (SSP5-8.5). Finally, to examine the accuracy of the two mentioned models in predicting future precipitation of the stations, three error indicators were applied; R^2 , RMSE and MAPE (relations 8 to 10):

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n A_t F_t}{\sqrt{\sum_{t=1}^n A_t^2 \sum_{t=1}^n F_t^2}} \quad (8)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (9)$$

$$\text{MAPE} = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|}{n} \times 100 \quad (10)$$

In the above equations, A_t is the observational data, F_t is the simulated data and N is the number of data.

Results and Discussion

According to the results of the trend analysis, during the statistical period (1994–2023), the Q statistic (Sen's slope estimator) and Z (Mann-Kendall test) were negative for all stations, indicating that the total annual precipitation in all 12 cities showed a decreasing trend. The largest Q values were observed in Qazvin (-81.8), Ardabil (-63.8), and Zanjan (-45.8). The highest negative Z values occurred in Sanandaj (-4.62), Zanjan (-4.57), and Qazvin (-4.42), while the lowest was in Rasht (-2.98). Since the Z scores in all cities were less than -2.58, a significant downward trend in precipitation during the past 30 years is confirmed at the 99% confidence level.

In the second part of the study, after validating the performance of LARS-WG8 in simulating base-period precipitation (1980–2010), the ACCESS-ESM1-5 and CNRM-CM6-1 models were used to predict future precipitation under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. According to the results, Urmia is projected to experience decreased precipitation in all months under both models. Tehran, Tabriz, Ardabil, Gorgan, and Rasht will also face significant reductions in most months, with only slight increases (less than 20%) under some scenarios. Zanjan, Sanandaj, Qazvin, Mashhad, Bojnourd, and Semnan are expected to experience up to a 50% increase in precipitation in at least one late-spring or summer month. Overall, projections from both models suggest that all 12 cities will experience a significant reduction in precipitation compared to the long-term average during most months of the next 20 years.

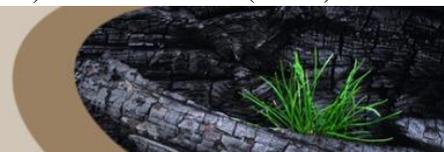
Finally, model accuracy was assessed using R^2 , RMSE, and MAPE. Although both models showed relatively high error rates, each city exhibited higher accuracy under one model. Consequently, the CNRM model was selected for Sanandaj, Ardabil, Tehran, and Gorgan, while the ACCESS model was selected for the remaining cities.

Conclusion

The aim of the present study was to forecast and analyze precipitation trends in selected cities of northern Iran using GCM models, in order to reveal the extent of climate change impacts on different climatic regions. Based on Sen's slope estimator and Mann-Kendall tests, precipitation in all cities during the past 30 years (1994–2023) showed a significant decreasing trend at the 99% confidence level. The decrease was most pronounced in mountainous cities in the northwest (Qazvin, Ardabil, and Zanjan) and least in humid coastal cities (Rasht and Gorgan).

Projections from the ACCESS and CNRM models suggest that precipitation patterns in the study area will undergo significant changes. Over the next 20 years (2041–2060), most cities will face decreasing precipitation, with reductions exceeding 60% in some months in northwestern regions. At the same time, some low-precipitation cities, such as Semnan, may experience increases during warm months. The largest changes—both increases and decreases—are projected for the warm season (late spring to late summer).

A comparison of total annual precipitation during the observation and forecast periods confirmed a significant decline in all 12 cities, with the greatest decrease expected in Rasht and the smallest in Semnan. These results highlight temporal and spatial anomalies in precipitation, confirm the strong influence of climate change on the region, and underscore the need for effective water resource management and adaptation strategies.



روند یابی و پیش‌نمایی بارش در شهرهای منتخب شمال ایران با بهره‌گیری از مدل‌های ACCESS و CNRM

رقیه ملکی مرشت^۱، برومند صلاحی^{۲*}، مهنناز صابر^۳

^۱ پژوهشگر پسا دکتری آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۲ استاد آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

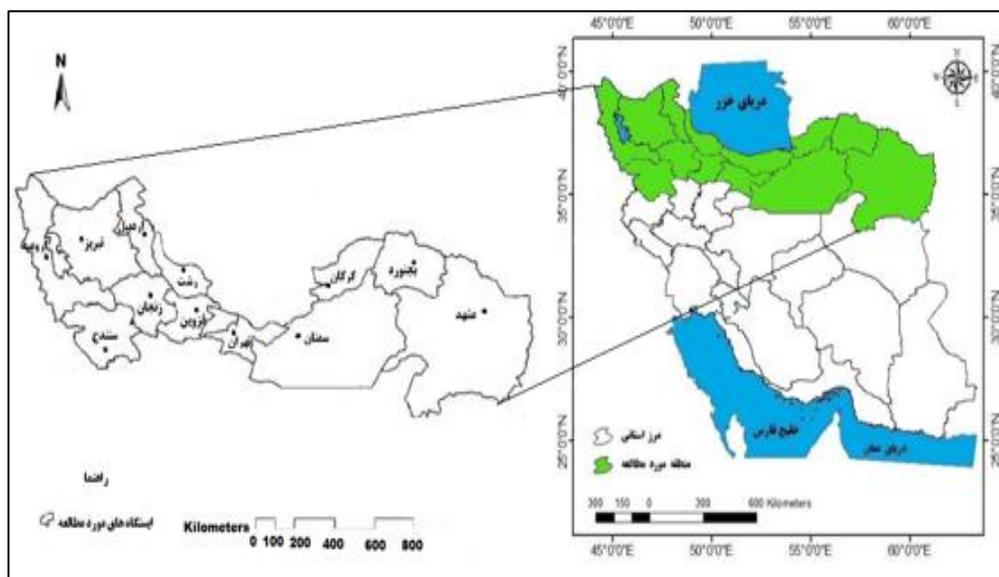
اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله:	تغییر اقلیم، موجب تغییر در توزیع زمانی و مکانی بارش‌ها در سراسر جهان شده است. مطالعه حاضر، با هدف پیش‌نگری و روند یابی بارش شهرهای منتخب نیمه شمالی ایران انجام گرفت. در راستای هدف پژوهش، نخست، روند بارش ۳۰ ساله (۱۹۹۴-۲۰۲۳) هریک از شهرها بر اساس آزمون من-کندال و تخمین گر Sen بررسی گردید. در مرحله دوم با بهره‌گیری از ریزگردان LARS- WG8 که به‌روزترین نسخه این نرم‌افزار است، بارش منطقه مورد مطالعه، تحت سناریوهای (SSP2-4.5) و (SSP5-8.5)، دو مدل ACCESS-ESM1-5 و CNRM-CM6-1 برای ۲۰ سال آینده (۲۰۴۱-۲۰۶۰) پیش‌نگری شد. سپس خروجی‌های دو مدل با استفاده از شاخص‌های اعتبارسنجی R2، MAPE و RMSE، جهت انتخاب مناسب‌ترین مدل، بررسی و مقایسه گردید. نتایج حاصل از آزمون شیب سن و من-کندال، نشان داد که طی ۳۰ سال اخیر (۱۹۹۴-۲۰۲۳)، الگوی بارش در همه ایستگاه‌های منطقه، دستخوش تغییر شده و روند کاهشی معناداری در سطح اطمینان ۹۹ درصد داشته است. این کاهش در شهرهای قزوین، اردبیل، زنجان، بیشتر و در رشت و گرگان کمتر بوده است. طبق پیش‌نگری انجام‌شده بر اساس سناریوهای دو مدل ACCESS-ESM1-5 و CNRM-CM6-1 طی ۲۰ سال آتی (۲۰۴۰-۲۰۶۰) کل منطقه مورد مطالعه، در اغلب ماه‌های سال با کاهش بارش مواجه خواهند شد. میزان کاهش بارندگی در شمال غرب در برخی ماه‌های سال بیش از ۶۰٪ خواهد بود. همچنین برخی شهرها در ماه‌های فصول گرم سال، افزایش بارش تجربه خواهند کرد. این افزایش در شهرهای کم بارش همچون سمنان، مشهودتر خواهد بود. در نهایت مقایسه مجموع بارش سالانه دوره مشاهداتی و پیش‌نگری شده، کاهش محسوس بارش را در کل منطقه مورد مطالعه، نسبت به دوره پایه تأیید نمود. یافته‌های پژوهش، حاکی از ناهنجاری‌های زمانی و مکانی بارش بوده، آثار تغییر اقلیم بر منطقه را تأیید می‌نماید و بر ضرورت اتخاذ سیاست‌های مدیریتی کارآمد جهت بهینه‌سازی مصرف منابع آب و توسعه روش‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی تأکید دارد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۹	
کلمات کلیدی:	
تغییر اقلیم	
روند بارش	
آزمون من-کندال	
ریزمقیاس نمایی اقلیمی	
شمال ایران	

بارش تا سال ۲۰۹۹ تا ۱۷/۶۸٪ کاهش پیدا می‌کند. نگوما و همکاران (Ngoma et al., 2021) به شبیه‌سازی بارش اوگاندا با مدل‌های CMIP6 پرداختند. آنان برای این کار از ۱۶ مدل GCM استفاده کردند. طبق پیش‌بینی انجام شده با اکثر مدل‌ها، بارش طی ماه‌های سپتامبر تا نوامبر افزایش خواهد یافت. مسگری و همکاران (Mesgari, Hosseini, Hemmesy, Houshyar & Partoo, 2022) به پیش‌بینی بارش منطقه MENAP بر اساس سناریوهای SSP پرداختند و یافته‌های آنان نشان داد که میزان بارش به‌جز مناطقی مانند دریای سیاه، مدیترانه، نواحی ساحلی دریای سرخ و مناطق کوهستانی و مرتفع، در سایر نقاط محدوده مورد مطالعه آنان عمدتاً کاهش خواهد یافت که بیشترین میزان کاهش بارش در کشورهای خاورمیانه رخ خواهد داد. کامروزم و همکاران (Kamruzzaman et al., 2023) تحت سناریوهای SSP مدل‌های GCM به پیش‌بینی بارش، دمای حداکثر و حداقل بنگلادش پرداختند. یافته‌های آنان نشان داده است که دما و بارش دوره آبی در این منطقه، روند افزایشی خواهد داشت. مو و همکاران (Mo et al., 2023) روند خشک‌سالی حوضه رودخانه چنگبی تحت سناریوهای SSP مدل‌های GCM را بررسی نمودند. نتایج پژوهش آنان حاکی از افزایش بارش در دوره‌های آبی بود. دسترنج و رستمی (Dastranj & Rostami, 2020) به ارزیابی و پیش‌بینی تغییرات اقلیم در دهه‌های آینده در ایستگاه‌های بابلسر، گرگان، رامسر، رشت، قزوین، تهران و زنجان با استفاده از مدل‌های GCMs پرداختند. طبق نتایج پژوهش آنان دمای حداکثر، حداقل و میانگین طی دهه‌های آبی نسبت به گذشته افزایش خواهد یافت اما بارش در دوره ۲۰۴۹-۲۰۲۰ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ نسبت به دوره مشاهداتی روند افزایشی خواهد داشت اما در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ نسبت به دوره ۲۰۴۹-۲۰۲۰ روند بارش کاهشی خواهد بود. کونانی و همکاران (Kounani, Ildoromi, Zenivand & Nouri, 2021) جهت ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه آبریز رحیم‌آباد لرستان، از مدل HadCEM3 و دو ریزگردان LARS-WG و SDSM استفاده کرده‌اند. نتایج هر دو مدل، حاکی از افزایش دما و کاهش بارش در منطقه مورد مطالعه، بوده است. محمدی و همکاران (Mohammadi, Khalili & Mohammadi, 2022) به پیش‌نگری تغییرات دما و بارش با استفاده از LARS-WG در زاگرس جنوبی پرداختند. نتایج پژوهش آنان حاکی از روند افزایشی دما و روند کاهشی بارش بوده است. حشمتی و رضانی (Heshmati & Ramezani Etedali, 2021) تغییر اقلیم آبی کرمانشاه را بر اساس مدل LARS-WG و سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 پیش‌بینی کردند. آنان ضمن تأیید عملکرد مناسب مدل LARS-WG، افزایش دمای حداکثر، دمای حداقل و تغییر الگوی بارش آینده را در منطقه پیش‌بینی نموده‌اند. انصاری و همکاران (Ansari, Dehban, Zareian & Farokhnia, 2022) به بررسی تغییرات دما و بارش در حوضه‌های آبریز ایران طی سال‌های (۲۰۳۹-۲۰۲۰) بر اساس خروجی مدل CMIP6 و تحت سناریوهای SSP پرداختند. طبق یافته‌های آنان، نواحی غربی ایران بیشترین کاهش بارش را طی ۲۰ سال آبی تجربه خواهند کرد. رزمخواه و همکاران (Razmkhah, Masoudi, Rostami Ravari & Fararouie, 2023) آثار تغییر اقلیم در ایستگاه آباده را با بهره‌گیری از مدل LARS-WG ارزیابی نمودند. طبق یافته‌های آنان، بارش در این منطقه افزایش خواهد یافت.

بررسی یافته‌های پژوهشگران نشان می‌دهد که در نقاط مختلف جهان، الگوها و روندهای متنوعی برای بارش ارائه شده است که این امر، عدم قطعیت در رابطه با آثار تغییر اقلیم را تشدید نموده و لزوم مطالعه حوزه‌ای و منطقه‌ای آثار تغییر اقلیم بر پارامترهای آب و هوایی را تقویت می‌نماید. با توجه به این که در اغلب مطالعات انجام شده، پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی برای آینده دور و در محدوده کوچک (به وسعت یک شهر یا استان) صورت گرفته که این امر احتمال خطای پیش‌بینی را افزایش می‌دهد، لذا در پژوهش حاضر سعی شد تا پیش‌بینی برای آینده نزدیک و برای منطقه‌ای وسیع انجام شود تا امکان ارائه نقشه پراکندگی بارش آینده و مقایسه آن با بارش گذشته فراهم گردد.

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، مراکز استان‌های نیمه شمالی ایران است که بالاتر از ۳۵ درجه عرض جغرافیایی واقع شده‌اند. استان‌های نیمه شمالی ایران به جهت داشتن موقعیت جغرافیایی خاص، توپوگرافی منحصربه‌فرد، وجود کوه‌ها و قله مرتفع نظیر البرز، سبلان و سهند، وجود دریاچه وسیع خزر و سایر دریاچه‌های داخلی، دارای تنوع اقلیمی فراوان می‌باشد. در شکل ۱ نقشه محدوده مورد مطالعه، ارائه شده است.



شکل ۱- نقشه محدوده مورد مطالعه

Fig.1. Map of the study area

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر، به روند یابی و پیش‌نمایی بارش شهرهای منتخب نیمه شمالی ایران (اردبیل، تبریز، بجنورد، مشهد، گرگان، سمنان، زنجان، تهران، ارومیه، گرگان، رشت، سنندج)، با بهره‌گیری از مدل‌های ACCESS و CNRM پرداخته شد. به‌منظور روند یابی مجموع بارش سالانه، داده‌های دوره آماری ۳۰ سال اخیر (۱۹۹۴-۲۰۲۳) بارش ایستگاه‌های منتخب، از سازمان هواشناسی کشور دریافت و از آزمون‌های من-کندال و شیب سن که جزء روش‌های ناپارامتریک هستند استفاده شد. چراکه در تعیین معناداری روند، زمانی که سری زمانی توزیع نرمال ندارد، به‌منظور تأیید صحت نتایج، بهتر است، از آزمون‌های ناپارامتری استفاده شود. جهت برآورد شیب واقعی روند در یک سری زمانی، استفاده از روش ناپارامتریک سنس^۱ می‌تواند یک روش مناسب باشد. این روش از تحلیل تفاوت بین مشاهدات یک سری زمانی بهره می‌گیرد و در مواقعی که داده‌های گم‌شده وجود دارد یا توزیع داده‌ها نرمال نیست، به‌راحتی قابل استفاده است (Serrano, Mateos & Garcia, 1999). اساس برآوردگر شیب سن، بر محاسبه یک شیب میان‌برای سری زمانی و قضاوت نمودن در مورد معناداری شیب حاصل در سطوح اعتماد مختلف می‌باشد (Maleki, Solaimame, Jaedaei & Shater, 2012).

این آزمون شامل مراحل زیر است:

مرحله اول: محاسبه شیب بین هر جفت داده (رابطه ۱).

$$Qi = \frac{X_t - X_s}{t-s}, i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

که X_t و X_s به ترتیب داده در زمان‌های $t > s$ و $N = \frac{n(n-1)}{2}$ می‌باشد. با اعمال این رابطه برای هر دو جفت داده، یک سری زمانی از شیب‌های محاسبه شده به دست خواهد آمد که از محاسبه میانه این سری زمانی، برآورد شیب سن مربوط به خط روند، حاصل می‌شود. مقدار مثبت این شیب، صعودی بودن روند و مقدار منفی آن، نزولی بودن روند را نشان می‌دهد. مرحله دوم: محاسبه‌ی پارامتر $C \alpha$ برای سطح اطمینان موردنظر (رابطه ۲).

$$C \alpha = Z_{1-\frac{\alpha}{2}} = \sqrt{\text{Var}(A)} \quad (2)$$

در رابطه فوق، Z چندک توزیع نرمال استاندارد می‌باشد (Salmi, 2002). مرحله سوم: محاسبه حدود اطمینان بالا و پایین با ضریب $(1-\alpha)$ می‌باشد که ابتدا مقادیر $M1$ و $M2$ با رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$M1 = \frac{N - C\alpha}{2} \quad M2 = \frac{N + C\alpha}{2} \quad (3)$$

که N تعداد شیب‌های محاسبه شده در بند الف است. مرحله چهارم: به منظور بررسی حدود اطمینان، در رابطه (۱) که از کوچک به بزرگ مرتب می‌گردد، $M1$ امین و $M2 + 1$ امین شیب به دست می‌آید. در صورتی که عدد صفر در دامنه بین دو شیب به دست آمده قرار گیرد، فرض صفر تأیید و سری زمانی بدون روند می‌باشد (Ghorbani, Vali & Zarepour, 2019).

به منظور تعیین معناداری روند، از آزمون من- کندال بهره گرفته شد. در این آزمون، فرض صفر، دلالت بر تصادفی بودن و نبود روند دارد. در این روش، نخست اختلاف بین هر مشاهده با تمامی مشاهدات بعد از آن محاسبه می‌گردد و پارامتر S بر اساس رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j + x_k) \quad (4)$$

در رابطه فوق n تعداد مشاهدات سری x_k و x_j به ترتیب داده‌های k ام و j ام سری هستند. در گام بعدی، واریانس s با رابطه (۵) محاسبه شد.

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

که n تعداد دنباله‌هایی است که در آن‌ها دست کم یک داده تکراری است. در نهایت آماره Z بر اساس رابطه (۶) حاصل گردید.

$$S = \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} \quad (6)$$

با فرض دو دامنه آزمون روند، فرض صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که شرط زیر (رابطه ۷) برقرار باشد:

$$|Z| < Z_{\alpha/2} \quad (7)$$

در رابطه فوق، Z سطح معناداری و Z_{α} آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معناداری است. در پژوهش حاضر از این آزمون برای سطح اعتماد ۹۹٪ و ۹۵٪ بهره گرفته شده است که در صورت مثبت بودن آماره Z ، روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن، روند نزولی می‌باشد (Kendall, 1962).

در بخش بعدی پژوهش، جهت پیش‌نگری بارش آینده، ابتدا داده‌های دوره پایه طی سال‌های (۱۹۸۰-۲۰۱۰) در ریزگردان

LARS-WG8، شبیه‌سازی شد. (نسخه ۸ نرم‌افزار LARS-WG به‌عنوان جدیدترین نسخه‌ی این نرم‌افزار، به داده‌های گزارش ششم CMIP6) استناد می‌کند و مشکلات و محدودیت‌های موجود در نسخه‌های قبلی را ندارد و ۱۵ مدل از سری مدل‌های CMIP6 را شامل می‌شود. بعد از شبیه‌سازی بارش دوره پایه، پیش‌بینی بارش ۲۰ سال آتی (سال‌های ۲۰۴۱ تا ۲۰۶۰) با بهره‌گیری از دو مدل ACCESS-ESM1-5 و CNRM-CM6-1 تحت سناریوهای (SSP2-4.5) و (SSP5-8.5) انجام گرفت. در جدول ۱، مشخصات مدل‌های استفاده‌شده در این پژوهش ارائه گردیده است.

جدول ۱- مشخصات مدل‌های GCM مورد استفاده در پژوهش

Table 1- Specifications of GCM models used in the research (Shahinejad, Yonesi, Kakavand & Yousefi Sohzabi, 2023)

مدل Model	مؤسسه یا کشور Institution or Country	رزولوشن Resolution
ACCESS-ESM1-5	Australia	1.875° × 1.25°, L38
CNRM-CM6-1	France	1.4° × 1.4°, L31

LARS-WG جزء مولدهایی است که از توزیع نیمه تجربی استفاده می‌کند و نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد. این مولد برای متغیرهای دمای حداقل و دمای حداکثر روزانه، بارش روزانه و ساعات آفتابی روزانه از توزیع نیمه تجربی بهره می‌گیرد (رابطه ۸).

$$EMP = \{a_0, a_i, h_i, \dots, i = 0, 1, 2, \dots, 10\} \quad (8)$$

که در آن EMP^1 هیستوگرامی با ۱۰ بازه با شدت‌های مختلف بارش است (رابطه ۹).

$$[a - 1, a_i] \quad a_i - 1 < a_i \quad (9)$$

این توزیع نیاز به ۲۱ پارامتر دارد و بر نسخه‌های پیشین برتری دارد. چرا که در نسخه‌های قبلی، سری خشک و تر با تعداد پارامترهای کمتری نشان داده می‌شد (Razmkhah et al., 2023).

در نهایت جهت بررسی دقت دو مدل ACCESS-ESM1-5 و CNRM-CM6-1 در پیش‌بینی بارش آینده ایستگاه‌ها، از سه شاخص خطاسنجی؛ ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) استفاده شد. شاخص‌های مذکور در روابط (۱۰ تا ۱۲) ارائه شده‌اند:

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n A_t F_t}{\sqrt{\sum_{t=1}^n A_t^2 \sum_{t=1}^n F_t^2}} \quad (10)$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}}{n} \quad (11)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|}{n} \times 100 \quad (12)$$

در معادلات فوق، A_t داده‌های مشاهداتی، F_t داده‌های شبیه‌سازی‌شده و N تعداد داده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

نتایج روند یابی بارش ۳۰ سال اخیر (۱۹۹۴-۲۰۲۳) بر اساس تخمین گر Sen و Mann-Kendall

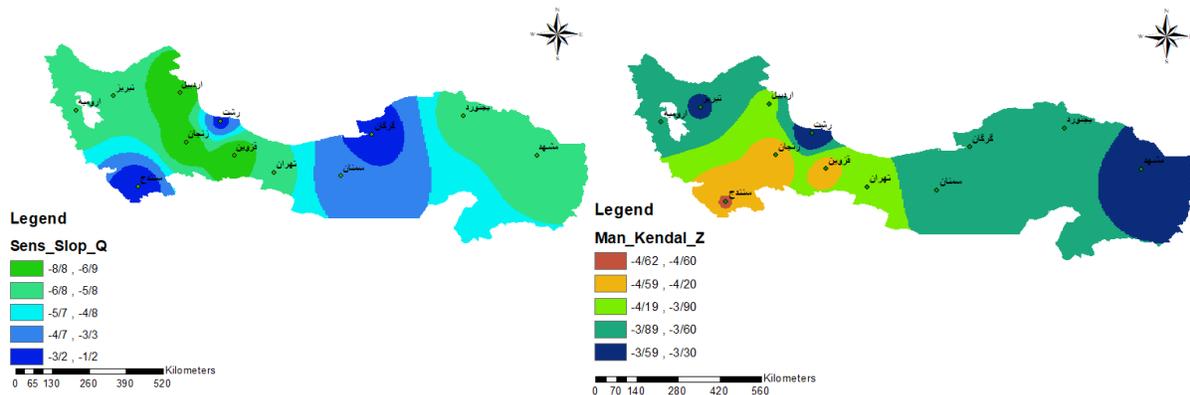
نتایج تحلیل روند مجموع بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه، بر مبنای سری‌های زمانی بلندمدت در مقیاس سالانه بر اساس شیب سن (جدول ۲) نشان داد که طی دوره آماری مورد مطالعه (۱۹۹۴-۲۰۲۳) در همه ایستگاه‌ها، آماره Q (برآوردگر شیب سن) و Z (آزمون من-کندال) منفی بوده و با توجه به این که تمام مقادیر Z در این جدول به غیر از ایستگاه رشت برای سایر ایستگاه‌های محدوده مورد سه ستاره بوده (سطح اطمینان ۰/۹۹)، بنابراین در همه ایستگاه‌ها روند بارش سالانه در ۳۰ سال گذشته به صورت معنادار کاهش یافته است. در ستون Q (Sen's Slope) مقادیر منفی تأیید می‌کنند که در همه ایستگاه‌ها، میزان بارش سالانه به طور متوسط در حال کاهش است. طبق داده‌های ارائه شده در این ستون از جدول ۲، بالاترین میزان کاهش‌ها به ترتیب در قزوین ۸۱/۸-، اردبیل ۶۳/۸- و زنجان ۴۵/۸- بوده است. لذا این سه شهر که جزء شهرهای کوهستانی شمال غرب محسوب می‌شوند، بیشترین کاهش سالانه بارش را در مقایسه با سایر ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه، تجربه کرده‌اند. کمترین روند کاهشی بارش طی ۳۰ سال اخیر نیز مربوط به دو شهر گرگان و رشت بوده است که جزء شهرهای مرطوب سواحل دریای خزر هستند. شهرهای مشهد، بجنورد، تبریز، ارومیه، تهران و سمنان نیز روند کاهشی کم تا متوسط را تجربه کرده‌اند. طبق نتایج آزمون من-کندال، بالاترین مقادیر Z مربوط به ایستگاه‌های سنندج، زنجان و قزوین و به ترتیب ۶۲/۴، ۵۷/۴-، ۴۲/۴- و کمترین مقدار آن با رقم ۹۸/۲- مربوط به ایستگاه رشت بود؛ اما با توجه به این که در همه ایستگاه‌ها نمره Z کمتر از ۵۸/۲- است، لذا وجود روند نزولی معنادار بارش ۳۰ سال اخیر، در کل منطقه مورد مطالعه، در سطح اطمینان ۰/۹۹ پذیرفته می‌شود (جدول ۲). نقشه پراکنش مقادیر Q و Z (جهت نمایش عینی و ملموس) در شکل ۲، ارائه شده است. نمودارهای شیب سن در شکل ۳، روند نزولی و کاهش بارش در همه ایستگاه‌های منطقه را طی ۳۰ سال اخیر (۱۹۹۴-۲۰۲۳) تأیید می‌نماید.

جدول ۲- نتایج واکاوی تغییرات مجموع بارش سالانه ایستگاه‌ها بر اساس شیب سن (۱۹۹۴-۲۰۲۳)

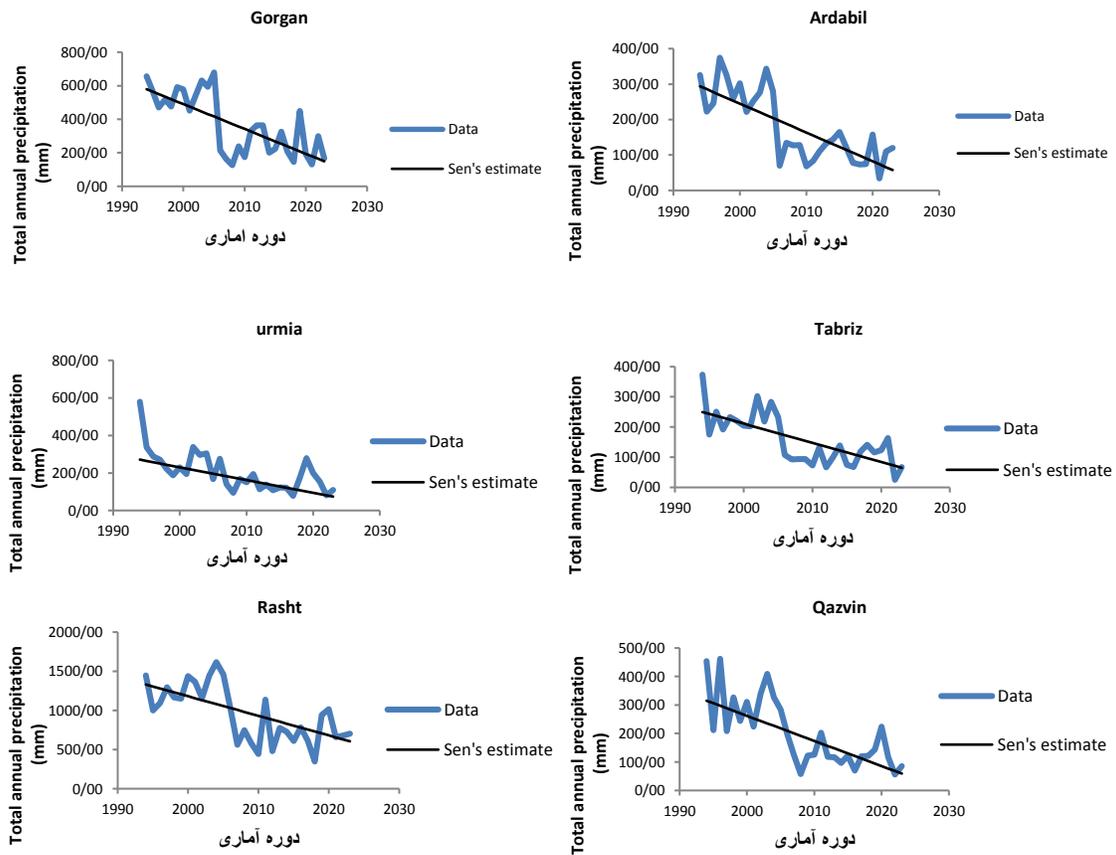
Table 2- Results of analysis of changes in total annual precipitation of stations based on Sen's slope (1994-2023)

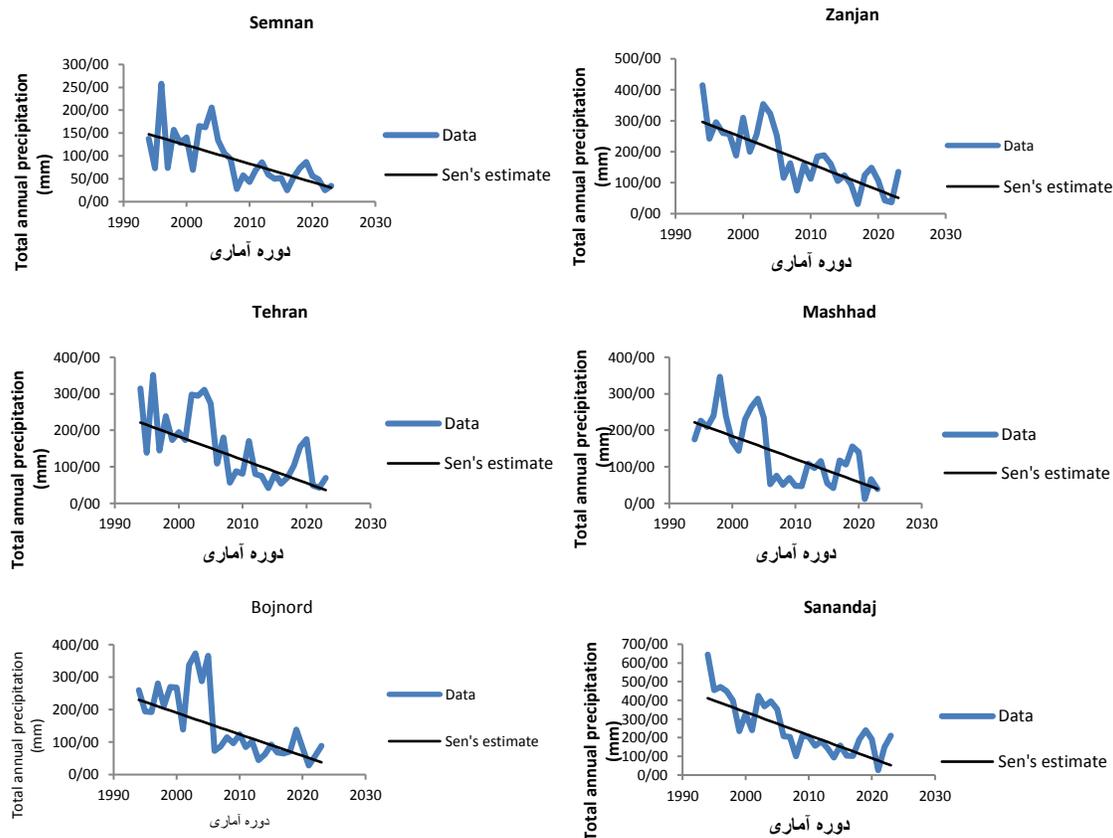
Stations	Z	Significant	Q	Qmin99	Qmax99	B	Bmin99	Bmax99
Bojnourd	-3.85	***	-6.63	-1.10	-2.91	4.55	6.85	2.58
Mashhad	-3.39	***	-6.28	-1.08	-1.19	4.35	6.65	1.83
Gorgan	-3.60	***	-1.48	-2.24	-5.51	1.08	1.47	6.46
Semnan	-3.87	***	-4.03	-6.58	-1.26	2.84	4.08	1.33
Tehran	-3.91	***	-6.38	-1.09	-2.26	4.38	6.84	2.31
Rasht	-2.98	**	-2.50	-4.18	-3.84	2.18	2.97	1.15
Qazvin	-4.42	***	-8.81	-1.42	-4.00	6.15	8.90	3.59
Zanjan	-4.57	***	-8.45	-1.25	-4.88	5.83	7.98	4.11
Sanandaj	-4.62	***	-1.24	-1.86	-6.86	8.32	1.14	5.62
Ardabil	-3.91	***	-8.63	-1.27	-4.15	5.71	8.05	3.67
Tabriz	-3.53	***	-6.37	-9.72	-2.56	4.66	6.12	2.72
Urmia	-3.82	***	-6.80	-1.21	-3.21	5.02	7.71	4.55

*** و ** داده‌ها در سطح ۹۹ درصد معنادار است.



شکل ۲- مقادیر Q و Z بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه (۱۹۹۴-۲۰۲۳)
 Fig. 2. Q and Z values for precipitation at the study area (1994-2023)





شکل ۳- تغییرات روند مجموع بارش سالانه ایستگاه‌های مورد مطالعه بر اساس شیب سن (۱۹۹۴-۲۰۲۳)

Fig.3. Changes in the trend of total annual precipitation of the studied stations based on Sen's slope (1994-2023)

نتایج شبیه‌سازی و پیش‌نگری بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه

پس از آماده‌سازی داده‌های ورودی و اطمینان از همگنی آن‌ها، مدل LARS-WG اجرا گردید. در نخستین مرحله از اجرای این مدل، توزیع تجربی سری‌های تر و خشک به دست آمد. مقادیر آزمون ناپارامتریک کای اسکور و مقدار احتمال P-Value جهت مقایسه بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده ایستگاه‌های مورد مطالعه، (جدول ۳) نشان می‌دهد؛ در ماه‌هایی که ارقام کای اسکور بزرگ‌تر از ۰/۰۵ است تفاوت چندانی معناداری بین مقادیر بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده وجود ندارد؛ اما اگر این مقدار کمتر از ۰/۰۵ باشد تفاوت معنادار می‌باشد. همچنین در ماه‌هایی که رقم P-Value ایستگاه‌ها از ۰/۰۵ کمتر است، نشان‌دهنده معنادار بودن نتایج است؛ درحالی‌که P-Value بزرگ‌تر از ۰/۰۵ حاکی از این است که نتایج کمتر معنادار هستند بنابراین احتمال تصادفی بودن نتایج در چنین حالتی بیشتر است. طبق توضیحات ذکرشده، عملکرد LARS-WG در شبیه‌سازی بارش متوسط ارزیابی شد.

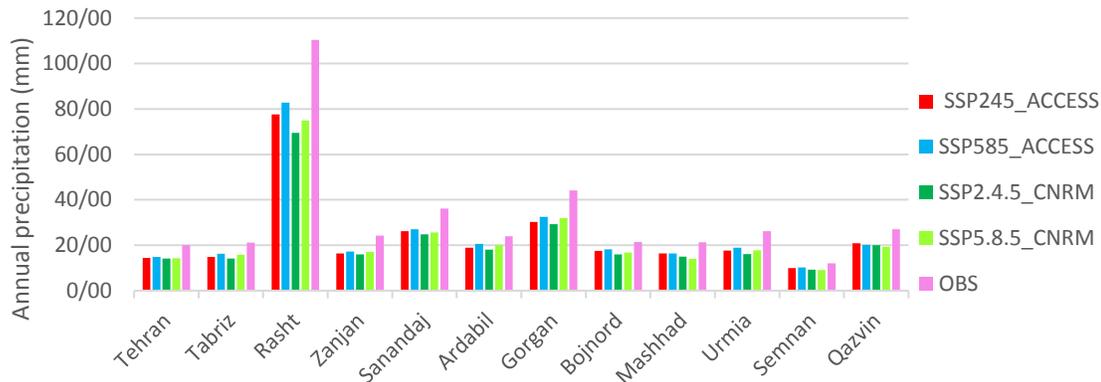
پس از ارزیابی دقت نرم‌افزار ریزگردان LARS-WG در شبیه‌سازی بارش دوره پایه (۱۹۸۰-۲۰۱۰)، جهت پیش‌نمایی بارش آبی ایستگاه‌ها از دو مدل ACCESS-ESM1-5 و CNRM-CM6-1 تحت سناریوهای (SSP2-4.5) و (SSP5-8.5)، بهره گرفته شد. بررسی نتایج ارائه شده در نمودار مقایسه‌ای تغییرات بارش پیش‌بینی‌شده ۲۰ سال آبی (۲۰۴۱-۲۰۶۰) بر اساس سناریوهای دو مدل ACCESS و CNRM و دوره مشاهداتی (۱۹۸۰-۲۰۱۰) (شکل ۴)، همچنین نقشه پراکنده مجموع بارش سالانه پیش‌بینی‌شده بر اساس سناریوهای هر دو مدل (شکل ۵) و نمودارهای درصد تغییرات بارش پیش‌بینی‌شده در مقایسه با دوره پایه (شکل ۶) نشان داد که در ۲۰ سال آینده کل شهرهای مورد مطالعه در اغلب ماه‌ها به ویژه ماه‌های مربوط به فصول گرم شاهد کاهش بارش خواهد بود.

طبق نتایج، طی ۲۰ سال پیش‌بینی‌شده، ایستگاه ارومیه تحت سناریوهای هر دو مدل در تمامی ماه‌های سال کاهش بارش خواهد داشت. ایستگاه‌های تهران، تبریز، اردبیل، گرگان و رشت تحت سناریوهای هر دو مدل و در بیشتر ماه‌های سال کاهش محسوس و تحت یکی از سناریوها افزایش بسیار جزئی بارش (کمتر از ۲۰ درصد) را در برخی از ماه‌ها تجربه خواهند کرد.

جدول ۳- مقادیر K-S و P-Value توزیع بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده ایستگاه‌ها (۱۹۸۱-۲۰۱۰)

Table 3- K-S and P-Values of the observed and simulated precipitation distributions of the stations (1981-2010)

ایستگاه Station	معیار Criteria	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
اردبیل Ardabil	K-S P-Value	0.09 1	0.06 1	0.03 1	0.04 1	0.06 1	0.13 0.98	0.05 1	0.06 1	0.07 1	0.15 0.92	0.08 1	0.06 1
بجنورد Bojnord	K-S P-Value	0.04 1	0.03 1	0.05 1	0.07 1	0.03 1	0.06 0.60	0.21 0.99	0.11 0.92	0.15 1	0.08 1	0.05 1	0.04 1
مشهد Mashad	K-S P-Value	0.12 0.99	0.03 1	0.06 1	0.13 0.97	0.08 1	0.10 0.99	0.46 0.00	0.25 0.40	0.44 0.01	0.08 1	0.08 1	0.07 1
رشت Rasht	K-S P-Value	0.09 1	0.06 1	0.08 1	0.03 1	0.22 0.53	0.09 1	0.06 1	0.06 1	0.12 0.99	0.23 0.48	0.11 0.99	0.07 1
تهران Tehran	K-S P-Value	0.11 0.99	0.07 1	0.90 1	0.12 0.99	0.12 0.98	0.16 0.89	0.06 0.98	0.43 0.01	0.35 0.08	0.04 1	0.08 1	0.08 1
زنجان Zanjan	K-S P-Value	0.04 1	0.04 1	0.91 1	0.10 0.99	0.11 0.99	0.09 1	0.05 1	0.17 0.81	0.21 0.58	0.10 0.99	0.08 1	0.06 1
تبریز Tabriz	K-S P-Value	0.09 1	0.03 1	0.07 1	0.05 1	0.03 1	0.10 0.99	0.11 0.99	0.29 0.23	0.15 0.94	0.09 1	0.08 1	0.04 1
ارومیه urmia	K-S P-Value	0.08 1	0.07 1	0.13 1	0.15 1	0.15 1	0.14 0.98	0.06 1	0.19 1	0.22 1	0.04 0.92	0.09 1	0.05 1
سمنان semnan	K-S P-Value	0.11 0.99	0.08 1	0.07 1	0.06 1	0.08 1	0.08 1	0.31 0.16	0.26 0.35	0.35 0.08	0.16 0.89	0.10 0.99	0.09 1
قزوین Qazvin	K-S P-Value	0.12 0.99	0.04 1	0.06 1	0.08 1	0.07 1	0.06 1	0.14 0.95	0.16 0.89	0.05 1	0.11 0.99	0.13 0.97	0.07 1
گرگان Gorgan	K-S P-Value	0.10 0.99	0.05 1	0.09 1	0.04 1	0.12 0.99	0.05 1	0.15 0.99	0.03 0.99	0.04 1	0.04 1	0.08 1	0.05 1
سنندج Sanandaj	K-S P-Value	0.06 1	0.07 1	0.10 0.99	0.09 1	0.11 0.99	0.15 0.90	0.34 0.09	0.60 0	0.26 0.35	0.09 1	0.08 1	0.05 1

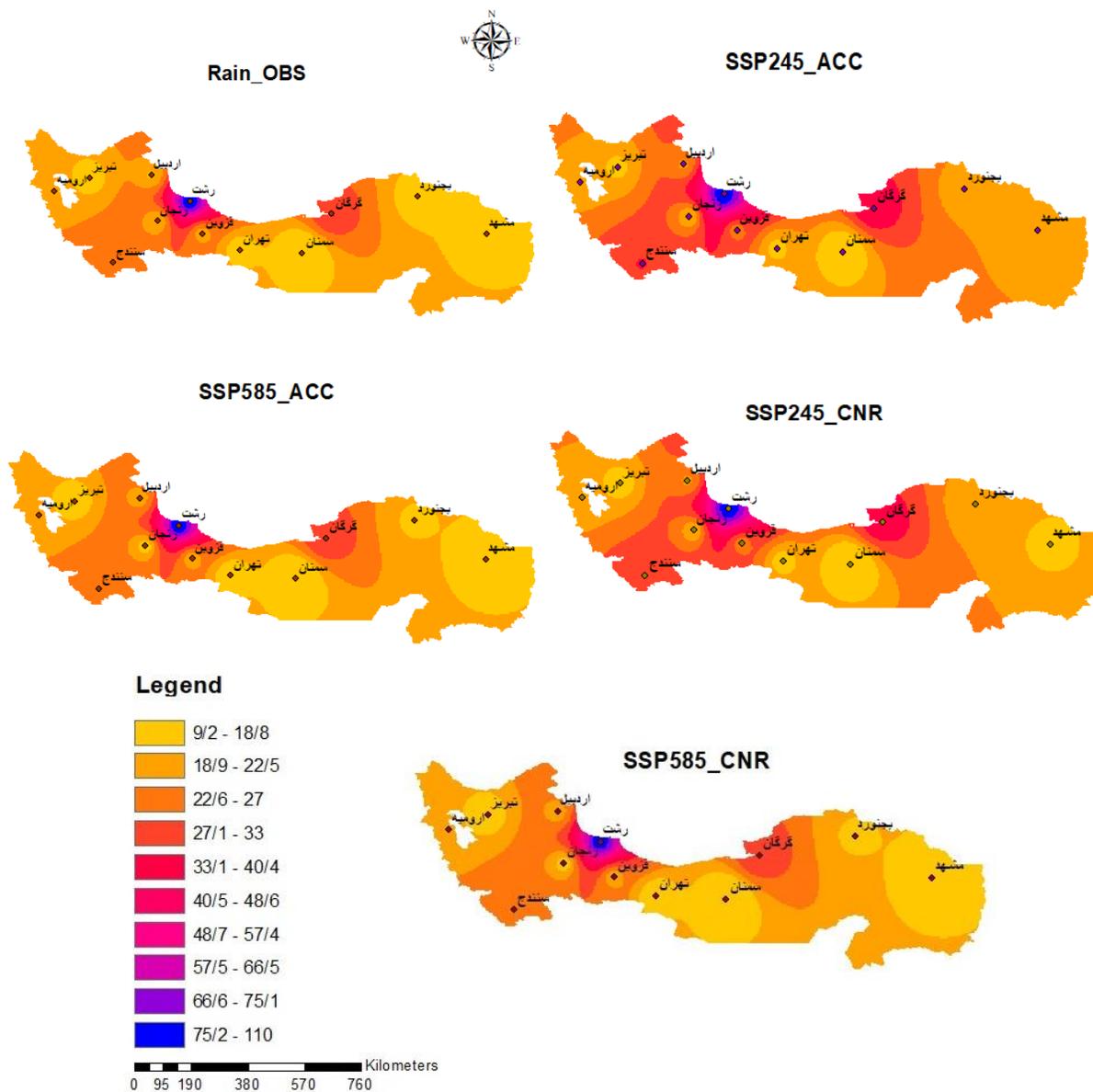


شکل ۴- نمودار مقایسه‌ای تغییرات بارش پیش‌نگری‌شده بر اساس سناریوهای دو مدل CNRM و ACCESS (۲۰۴۱-۲۰۶۰) و مشاهداتی (۱۹۸۰-۲۰۱۰)

Fig.4. Comparative chart of predicted precipitation changes based on the scenarios of the two CNRM and ACCESS models (2041-2060) and observations (1980-2010)

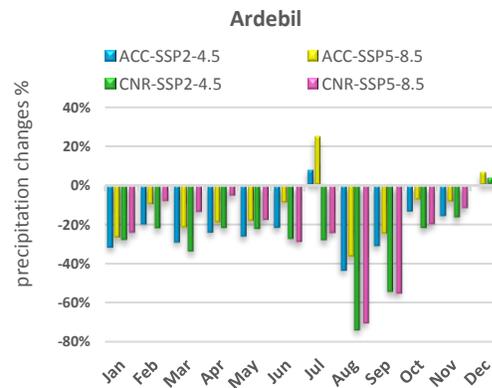
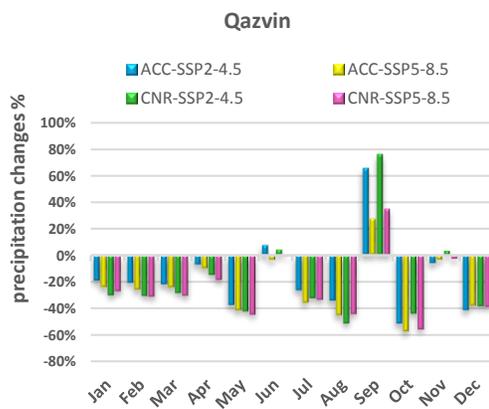
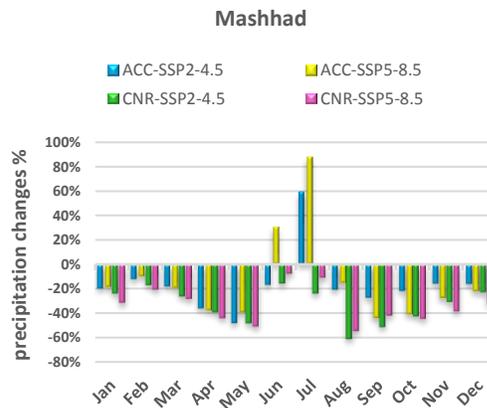
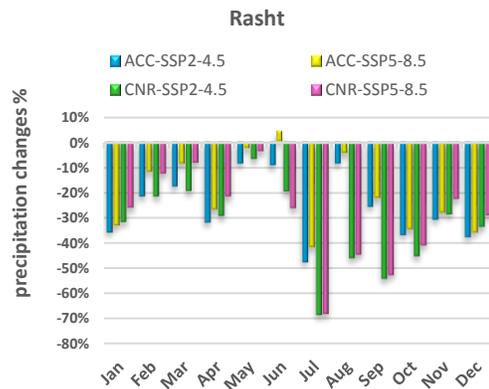
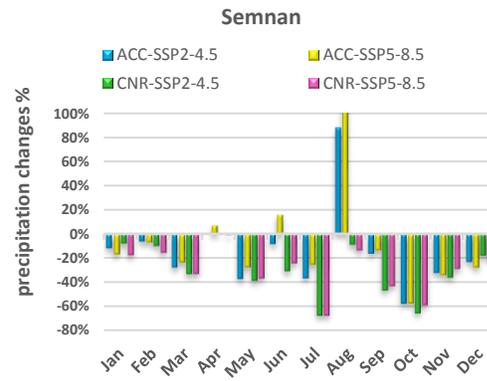
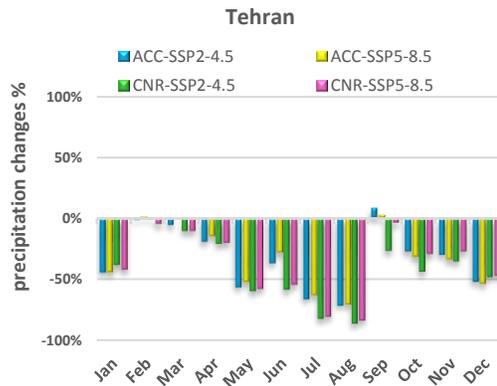
شهرهای زنجان، سنندج، قزوین، مشهد، بجنورد و سمنان دست‌کم در یکی از ماه‌های پایانی بهار و تابستان و تحت یکی از سناریوها تا ۵۰ درصد افزایش بارش خواهند داشت. در مجموع پیش‌بینی‌های انجام شده بر اساس سناریوهای هر دو مدل ACCESS-ESM1-5 و CNRM-CM6-1، نشان می‌دهد که هر ۱۲ ایستگاه مورد مطالعه، طی ۲۰ سال آینده در اغلب ماه‌های سال شاهد کاهش محسوس بارش نسبت به میانگین بلندمدت خواهند بود (شکل ۶).

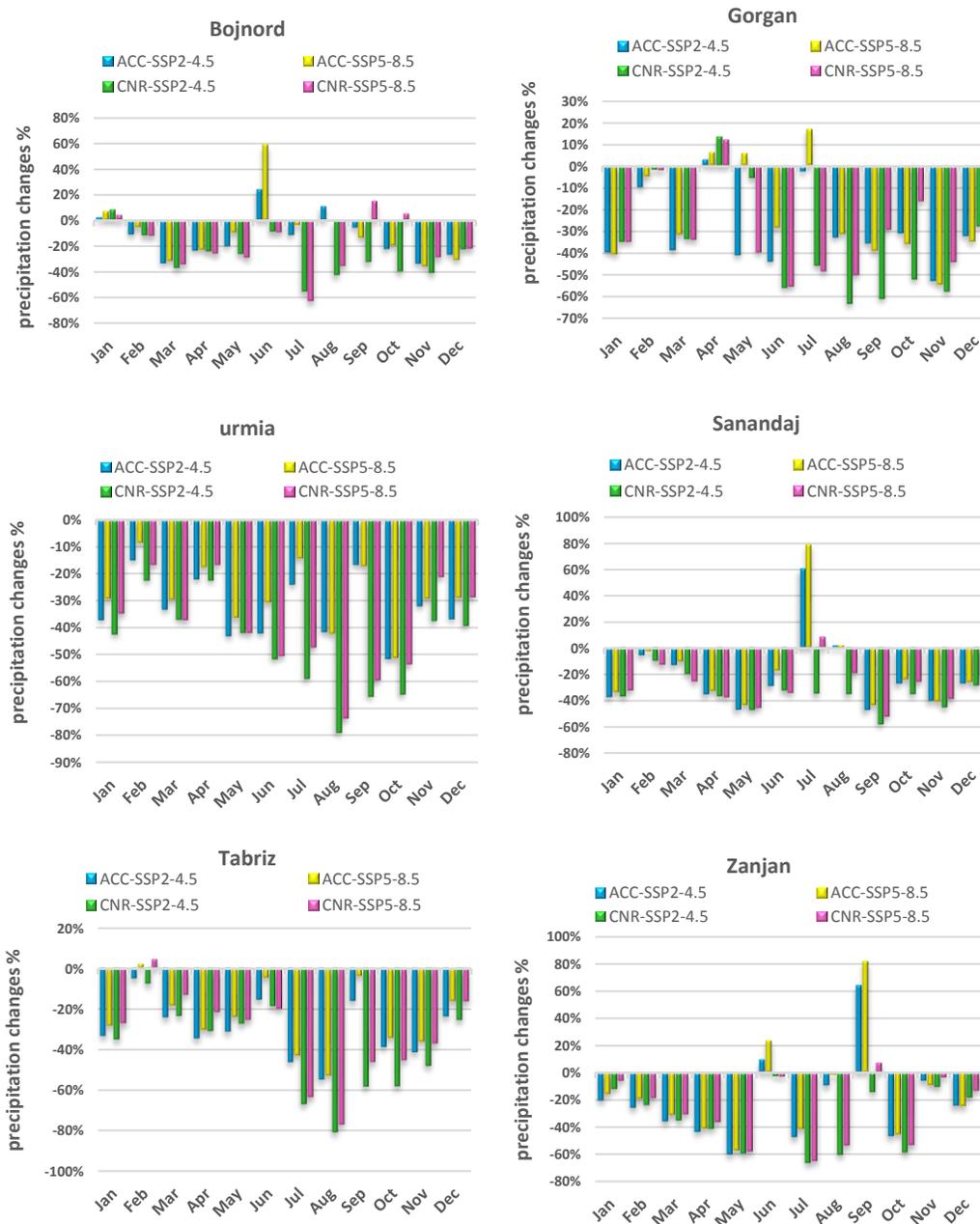
در نهایت دقت دو مدل مذکور در پیش‌نگری بارش، بر اساس سه شاخص خطا سنجی R^2 ، MAPE، RMSE بررسی شد که نتایج آن در جدول ۶ و همچنین به‌منظور نمایش عینی نتایج، در قالب نقشه در شکل ۷ ارائه شده است. طبق نتایج، در هر یک از دو مدل مقادیر حاصل از شاخص MAPE و RMSE به صفر نزدیک است، خطای مدل کمتر و دقت آن بیشتر است و بر اساس شاخص R^2 که دامنه آن بین ۰ و ۱ یا ۰ تا ۱۰۰ می‌باشد، هر مدلی که رقم این شاخص در آن به ۱ نزدیک است، دقت بالاتری در پیش‌بینی دارد. طبق توضیحات ارائه شده، اگرچه در هر دو مدل میزان خطا نسبتاً بالا بود اما هریک از ایستگاه‌ها در یک مدل و یک سناریو کمترین خطا و بالاترین دقت را داشتند که به‌عنوان مدل انتخابی برای آن ایستگاه در نظر گرفته شد (جدول ۷).



شکل ۵- نقشه پراکندگی مجموع بارش سالانه دوره مشاهداتی و پیش‌نگری شده بر اساس سناریوهای دو مدل CNRM و ACCESS (۲۰۴۱-۲۰۶۰)

Fig.5. Scatter map of total annual precipitation for the observed and predicted periods based on the two models scenarios: CNRM and ACCESS (2041-2060)





شکل ۶- نمودارهای درصد تغییرات بارش پیش‌بینی‌شده بر اساس سناریوهای دو مدل CNRM و ACCESS (۲۰۴۱-۲۰۶۰)

Fig.6. Graphs of percentage changes in predicted precipitation based on the scenarios of the two models CNRM and ACCESS (2041-2060)

جدول ۶- اندازه‌گیری دقت دو مدل ACCESS و CNRM در پیش‌نمایی بارش ۲۰ سال آتی (۲۰۴۱-۲۰۶۰)

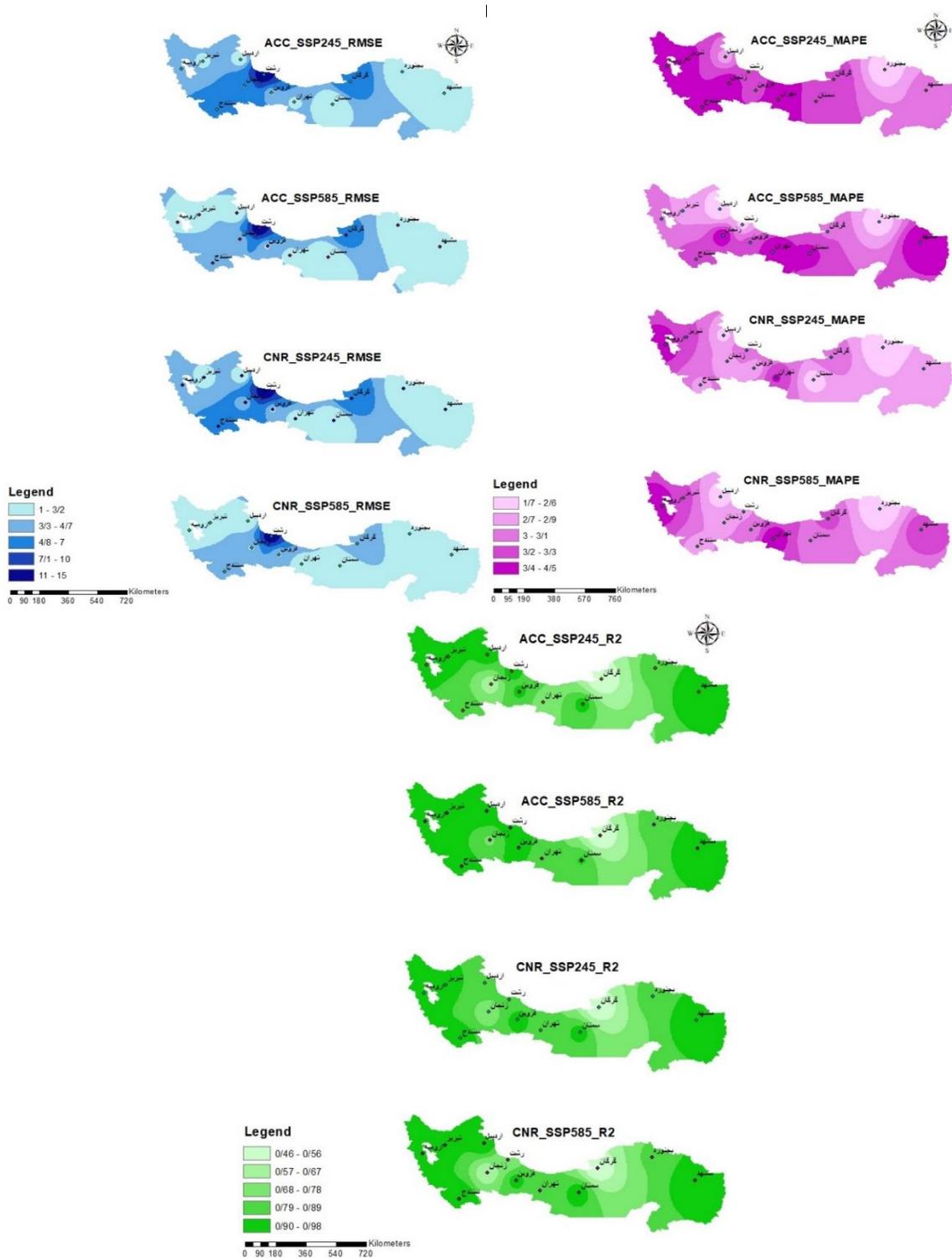
Table 6- Accuracy measurement of the two ACCESS and CNRM models in predicting precipitation for the next 20 years (2041-2060)

RMSE	MAPE	R ²	مدل Model	سناریو scenario	ایستگاه station	RMSE	MAPE	R ²	مدل Model	سناریو scenario	ایستگاه station
2.6	2.7	0.93	ACCESS	SSP2.4.5	قزوین Qazvin	1.8	1.7	0.91	ACCESS	SSP2.4.5	بجنورد Bojnord
2.7	2.7	0.93	ACCESS	SSP5.8.5		1.8	1.9	0.85	ACCESS	SSP5.8.5	
2.9	3.1	0.92	CNRM	SSP2.4.5		2.2	2.8	0.87	CNRM	SSP2.4.5	
3.1	2.9	0.93	CNRM	SSP5.8.5	زنجان Zanjan	2	2.2	0.88	CNRM	SSP5.8.5	مشهد Mashhad
3.5	3.1	0.77	ACCESS	SSP2.4.5		2.2	2.4	0.98	ACCESS	SSP2.4.5	
3.2	3.1	0.80	ACCESS	SSP5.8.5		2.2	3.1	0.96	ACCESS	SSP5.8.5	
3.4	3.2	0.78	CNRM	SSP2.4.5	سنندج Sanandaj	2.6	3.2	0.96	CNRM	SSP2.4.5	گرگان Gorgan
3.1	2.8	0.78	CNRM	SSP5.8.5		2.6	3.2	0.96	CNRM	SSP5.8.5	
4.1	2.9	0.92	ACCESS	SSP2.4.5		5.3	2.8	0.60	ACCESS	SSP2.4.5	
3.9	2.8	0.92	ACCESS	SSP5.8.5	اردبیل Ardabil	5.1	2.6	0.46	ACCESS	SSP5.8.5	سمنان Semnan
4.5	3.3	0.93	CNRM	SSP2.4.5		5.9	3.6	0.49	CNRM	SSP2.4.5	
4.2	2.8	0.98	CNRM	SSP5.8.5		4.6	3.1	0.70	CNRM	SSP5.8.5	
1.9	2.1	0.95	ACCESS	SSP2.4.5	تبریز Tabriz	1.0	2.7	0.91	ACCESS	SSP2.4.5	تهران Tehran
1.4	1.7	0.95	ACCESS	SSP5.8.5		1.0	2.9	0.89	ACCESS	SSP5.8.5	
2.1	3	0.89	CNRM	SSP2.4.5		1.1	2.9	0.92	CNRM	SSP2.4.5	
1.4	2.3	0.96	CNRM	SSP5.8.5	ارومیه Urmia	1.1	2.9	0.94	CNRM	SSP5.8.5	رشت Rasht
2.4	2.9	0.95	ACCESS	SSP2.4.5		2.4	3.3	0.86	ACCESS	SSP2.4.5	
2.0	2.3	0.94	ACCESS	SSP5.8.5		2.5	3.2	0.84	ACCESS	SSP5.8.5	
2.5	3.8	0.92	CNRM	SSP2.4.5	ارومیه Urmia	2.4	4.1	0.89	CNRM	SSP2.4.5	رشت Rasht
1.9	3.1	0.94	CNRM	SSP5.8.5		2.3	3.7	0.90	CNRM	SSP5.8.5	
3.2	3.1	0.94	ACCESS	SSP2.4.5		12.2	2.7	0.94	ACCESS	SSP2.4.5	
2.8	2.6	0.94	ACCESS	SSP5.8.5	ارومیه Urmia	11.1	2.0	0.92	ACCESS	SSP5.8.5	رشت Rasht
3.6	4.5	0.93	CNRM	SSP2.4.5		15	3.6	0.85	CNRM	SSP2.4.5	
3	3.8	0.93	CNRM	SSP5.8.5		13.1	2.8	0.83	CNRM	SSP5.8.5	

جدول ۷- مدل و سناریوی انتخابی هر یک از ایستگاه‌ها در پیش‌نگری بارش ۲۰ سال آتی (۲۰۴۱-۲۰۶۰)

Table 7- Selected model and scenario for each station in the precipitation forecast for the next 20 years (2041-2060)

سناریو Scenario	مدل Model	ایستگاه Station	سناریو Scenario	مدل Model	ایستگاه Station
SSP2.4.5	ACCESS	قزوین Gazvin	SSP2.4.5	ACCESS	بجنورد Bojnord
SSP5.8.5	ACCESS	زنجان Zanjan	SSP2.4.5	ACCESS	مشهد Mashhad
SSP5.8.5	CNRM	سنندج Sanandaj	SSP5.8.5	CNRM	گرگان Gorgan
SSP5.8.5	CNRM	اردبیل Ardabil	SSP2.4.5	ACCESS	سمنان Semnan
SSP5.8.5	ACCESS	تبریز Tabriz	SSP5.8.5	CNRM	تهران Tehran
SSP5.8.5	ACCESS	ارومیه Orumiyeh	SSP5.8.5	ACCESS	رشت Rasht



شکل ۷- نقشه‌های پراکندگی دقت سناریوهای دو مدل در پیش‌نمایی بارش ۲۰ سال آبی ایستگاه‌ها (۲۰۴۱-۲۰۶۰)

Fig.7. Accuracy maps of two models in precipitation forecasting, based on three indices: R2, MAPE, RMSE (2041-260)

نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم آثار گسترده‌ای بر الگوهای بارش نقاط مختلف جهان دارد. این تغییرات می‌تواند به صورت افزایش یا کاهش بارش، تغییر در توزیع زمانی و مکانی بارش و افزایش وقوع سیل و خشکسالی نمود پیدا کند. هدف از پژوهش حاضر، روندیابی و پیش‌نمایی بارش در شهرهای منتخب نیمه شمالی ایران با بهره‌گیری از مدل‌های GCMs بود تا میزان تأثیرپذیری بارش نقاط مختلف آب و هوایی این بخش از کشور، از تغییرات اقلیمی آشکار گردد. بدین منظور بارش ۳۰ سال اخیر (۱۹۹۴-۲۰۲۳) شهرهای منتخب نیمه شمالی ایران بر اساس آزمون‌های من-کندال و شیب سن روند یابی و تغییرات احتمالی آن طی ۲۰ سال آینده (۲۰۴۱-۲۰۶۰) با بهره‌گیری از دو مدل ACCESS و CNRM، پیش‌نگری شد. در نهایت دقت مدل‌ها بر اساس سه شاخص خطاسنجی R^2 ، MAPE، RMSE بررسی گردید و برای هر یک از ایستگاه‌ها، کم خطاترین مدل به عنوان مدل انتخابی، در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج حاصل از دو آزمون من-کندال و شیب سن، طی ۳۰ سال اخیر (۱۹۹۴-۲۰۲۳)، الگوی بارش در همه ایستگاه‌های منطقه، دستخوش تغییر شده و روند کاهشی معنادار در سطح اطمینان ۹۹ درصد داشته است. روند کاهشی در شهرهای قزوین، اردبیل، زنجان که جزء شهرهای کوهستانی شمال غرب محسوب می‌شوند بیشتر و در رشت و گرگان به‌عنوان نقاط پربارش و مرطوب ساحلی کمتر بوده است. طبق پیش‌بینی انجام شده بر اساس سناریوهای دو مدل ACCESS و CNRM الگوهای بارش در منطقه مورد مطالعه دستخوش تغییرات قابل‌توجهی خواهند شد، طی ۲۰ سال آتی (۲۰۴۰-۲۰۶۰) کل منطقه مورد مطالعه در اغلب ماه‌های سال با کاهش بارش مواجه خواهند شد. میزان کاهش بارندگی در شهرهای واقع در شمال غرب در برخی ماه‌های سال فصول گرم بیش از ۶۰٪ خواهد بود. همچنین برخی شهرهای منطقه دست‌کم بر اساس پیش‌بینی یکی از سناریوهای دو مدل، در ماه‌های گرم سال (اواخر بهار تا اواخر زمستان) افزایش بارش تجربه خواهند کرد که این افزایش در شهرهای کم بارش همچون سمنان، مشهدتر خواهد بود. طبق توضیحات ارائه شده و با توجه به این که بیشترین درصد افزایش و کاهش بارش در کل منطقه، مربوط به ماه‌های گرم سال است. لذا انتظار می‌رود طی دوره پیش‌نگری شده (۲۰۴۰-۲۰۶۰) بارش فصول گرم سال دستخوش تغییرات و نوسانات بیشتری باشد. در نهایت مقایسه مجموع بارش سالانه دوره مشاهداتی و پیش‌نگری شده بر اساس سناریوهای هر دو مدل، کاهش محسوس بارش را در هر ۱۲ ایستگاه مورد مطالعه نسبت به دوره پایه تأیید نمود که بیشترین میزان کاهش بارش پیش‌نگری شده نسبت به دوره مشاهداتی در شهر رشت و کمترین آن در شهر سمنان پیش‌نگری شد. نتایج ذکر شده، حاکی از ناهنجاری‌های زمانی و مکانی بارش منطقه است که این تغییرات، در توزیع بارش دهه‌های اخیر و آینده، نشان دهنده به‌هم‌ریختگی اقلیمی و از آثار تغییر اقلیم در این بخش از ایران بوده و بر ضرورت اتخاذ سیاست‌های مدیریتی کارآمد جهت مقابله با نوسانات بارشی، بهینه‌سازی مصرف منابع آب و توسعه روش‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی تأکید دارد.

با توجه به این که پژوهش حاضر کاهش بارش در برخی ایستگاه‌ها و بعضی از ماه‌های سال و افزایش آن را در برخی دیگر پیش‌بینی نمود، لذا با یافته‌های اکثر پژوهش‌گران از جمله دسترنج و رستمی (Dastranj & Rostami, 2020)، کونانی و همکاران (Kounani et al., 2021)، محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2022)، فنوج و همکاران (Phuong et al., 2020)، مسگری و همکاران (Mesgari et al., 2022)، رزمخواه و همکاران (Razmkhah et al., 2023)، مو و همکاران (Mo et al., 2023)، نگوما و همکاران (Ngoma et al., 2021) و کامروزمن و همکاران (Kamruzzaman et al., 2023) که برخی افزایش و برخی دیگر کاهش بارش آینده را در منطقه مورد مطالعه خود پیش‌بینی نموده‌اند، همسو بود. این تفاوت در نتیجه‌گیری‌ها، حاکی از تغییرات و نوسانات بارش دهه‌های اخیر می‌باشد که تحت تأثیر تغییر اقلیم رخ داده و می‌تواند پیامدهای مهمی برای منابع آب، کشاورزی و مدیریت بحران‌های محیطی داشته باشد. فلذا به‌منظور کاهش آثار منفی ناشی از تغییرات در منطقه مورد مطالعه، پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاری‌های مدیریت منابع آب، برنامه‌های کشاورزی و اقدامات سازگاری با تغییرات اقلیمی مورد بازبینی قرار گیرد.

همچنین، در راستای ارتقای دقت در پیش‌بینی بارش آینده، بر لزوم تحقیقات بیشتر با استفاده از مدل‌های ترکیبی و داده‌های گسترده‌تر تأکید می‌گردد. در مجموع، به‌منظور مدیریت پایدار منابع آب و توسعه منطقه‌ای در نیمه شمالی ایران، رصد دقیق تغییرات اقلیمی و تدوین راهبردهای مناسب برای این منطقه، ضروری می‌باشد.

سپاسگزاری

پژوهش حاضر، برگرفته از طرح پسادکتری به شماره قرارداد ۳۸۲ و تحت حمایت مالی دانشگاه محقق اردبیلی می‌باشد. لذا از زحمات معاونت محترم پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی و دانشکده علوم اجتماعی، تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

- Ansari, S., Dehban, H., Zareian, M., & Farokhnia, A. (2022). Investigation of temperature and precipitation changes in the Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 model. *Iranian Water Researches Journal*, 16(1), 11-24. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/iwrj.2022.11204>
- Bekele, D., Alamirew, T., Kebede, A., Zeleke, G., & Melesse, A. M. (2019). Modeling climate change impact on the hydrology of Keleta watershed in the Awash River Basin, Ethiopia. *Environmental Modeling & Assessment*, 24, 107-95. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10666-018-9619-1>
- 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), e2019GL086902. <https://doi.org/10.1029/2019GL086902>
- Dastranj, A., & Rostami, M. (2020). Assessment and prediction of climate change in the next decade, by downscaling General Circulation Models (GCMs). *Geography and Human Relationships*, 3(1), 252-268. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gahr.2020.238502.1421>
- Diress, S. A., & Bedada, T. B. (2021). Precipitation and Temperature trend analysis by Mann Kendall test: The case of Addis Ababa methodological station, Addis Ababa, Ethiopia. *African Journal on Land Policy and Geospatial Sciences*, 4(4), 517-526. <https://doi.org/10.48346/IMIST.PRSM/ajlp-gs.v4i4.24086>
- 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>
- Ghorbani, H., Vali, A. A., & Zarepour, H. (2019) Analysis of the Climatological Drought Trend Variations Using Mann-Kendall, Sen and Pettitt Tests in Isfahan Province. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 6(2), 129-146. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.6.2.129>
- Gupta, V., Singh, V., & Jain, M. K. (2020). Assessment of precipitation extremes in India during the 21st century under SSP1-1.9 mitigation scenarios of CMIP6 GCMs. *Journal of Hydrology*, 590, 125422. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125422>
- Hajarpour, A., Yousefi, M., & Kamkar, B. (2014). Assessment of Weather Assimilators of CLIMGEN, LARS-WG and Weather Man in Assimilation of three Different Climatic Parameters of three Different Climate (Gorgan, Gonbad and Mashhad). *Geography and Development Iranian Journal*, 12(35), 201-216. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/gdij.2014.1563>
- Heshmati, S., & Ramezani Etedali, H. (2021). Drought Forecasting for Future Periods Using LARS-WG Model: The Case Study of Kermanshah City. *Town and Country Planning*, 13(2), 647-669. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jtcp.2021.332432.670263>
- Kamruzzaman, M., Wahid, S., Shahid, S., Alam, E., Mainuddin, M., Islam, H. T., ... & Thorp, K. R. (2023). Predicted changes in future precipitation and air temperature across Bangladesh using CMIP6 GCMs. *Heliyon*, 9(5), e16274. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16274>

- Kendall, M. G. (1962). *Rank Correlation Methods*. New York: Hafner Publishing Company.
- Kounani, Z., Ildoromi, A., Zenivand, H., & Nouri, H. (2021). Impact of climate change on runoff of Silakhor-Rahimabad Basin in Lorestan. *Hydrogeomorphology*, 7(25), 17-1. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/hyd.2021.32443.1474>
- Maleki, H., Solaimame, M., Jaedaei, A., & Shater, S. (2012). Analysis of the precipitation and drought trend variations using Mann-Kendall and Sen Tests in Tehran Province. *Nivar*, 37(80-81), 43-54. [In Persian] https://nivar.irimo.ir/article_13186.html
- Mesgari, E., Hosseini, S. A., Hemmesy, M. S., Houshyar, M., & Partoo, L. G. (2022). Assessment of CMIP6 models' performances and projection of precipitation based on SSP scenarios over the MENAP region. *Journal of Water and Climate Change*, 13(10), 3607-3619. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.195>
- Mo, C., Tang, P., Huang, K., Lei, X., Lai, S., Deng, J., ... & Xing, Z. (2023). Evolution of drought trends under climate change scenarios in karst basin. *Water*, 15(10), 1934. <https://doi.org/10.3390/w15101934>
- Mohammadi, H., Khalili, R., & Mohammadi, S. (2022). Forecasting future temperature and precipitation under the effects of climate change using the LARS-WG climate generator (Case Study: South Zagros Region of Iran). *Nivar*, 45(114-115), 137-153. [In Persian] https://nivar.irimo.ir/article_146554.html
- Ngoma, H., Wen, W., Ayugi, B., Babaousmail, H., Karim, R., & Ongoma, V. (2021). Evaluation of precipitation simulations in CMIP6 models over Uganda. *International Journal of Climatology*, 41(9), 4743-4768. <https://doi.org/10.1002/joc.7098>
- Nilawar, A. P., & Waikar, M. L. (2019). Impacts of climate change on streamflow and sediment concentration under RCP 4.5 and 8.5: A case study in Purna river basin, India. *Science of Total Environment*, 650, 2685-2696. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.334>
- 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(9), 3461-3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... & Van Ypersele, J. P. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Phuong, N. N. D., Luan, L. T., Dong, V. V., & Khanh, N. L. N. (2020). Examining customers' continuance intentions towards e-wallet usage: The emergence of mobile payment acceptance in Vietnam. *The Journal of Asian Finance, Economics and Business*, 7(9), 505-516. <https://doi.org/10.13106/jafeb.2020.vol7.no9.505>
- Razmkhah, H., Masoudi, A., Rostami Ravari, A., & Fararouie, A. (2023). Evaluation of the climate change effect on meteorological parameters using LARS-WG, Case study: Abadeh station. *Integrated Watershed Management*, 3(2), 16-29. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/iwm.2023.1987752.1058>
- Salmi, T. (2002). *Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates-the Excel template application MAKESENS*. Ilmatieteen laitos.
- Sánchez, E., Domínguez, M., Romera, R., De la Franca, N. L., Gaertner, M. A., Gallardo, C., & Castro, M. (2011). Regional modeling of dry spells over the Iberian Peninsula for present climate and climate change conditions. *Climatic Change*, 107(3-4), 625-634. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0114-9>
- Sarabi, M., Dastorani, M. T., & Zarrin, A. (2020). Investigating Impact of Future Climate Changes on Temperature and Precipitation condition (Case Study: Torogh Dam Watershed, Mashhad). *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 3(1), 63-83. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jmas.2021.278862.1129>
- Serrano, A., Mateos, V. L., & Garcia, J. A. (1999). Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian Peninsula for the period 1921-1995. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 24(1-2), 85-90. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(98\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(98)00016-1)

- Shahinejad, B., Yonesi, H. A., Kakavand, A., & Yousefi Sohzabi, H. (2023). Evaluation of Climate Change Effects on the Entering Runoff the Makhmalkoh Dam Using the IHACRES Model. *Water and Irrigation Management*, 13(3), 735-754. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22516298.1402.13.3.9.5> [In Persian]
- Shiferaw, H., Gebremedhin, A., Gebretsadkan, T., & Zenebe, A. (2018). Modelling hydrological response under climate change scenarios using SWAT model :the case of Ilala watershed, Northern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(1), 437-449. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0439-8>



General Characteristics of the Lightning Phenomenon in Iran

Hamzeh Alizadeh ^{1*}, Hossein Asakareh ², Kohzad Raispour³

¹ Ph.D. Candidate, Department of Geography, University of Zanjan, Zanjan, Iran

² Professor, Department of Geography, University of Zanjan, Zanjan, Iran

³ Assistant Professor, Department of Geography, University of Zanjan, Zanjan, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 28 August 2024

Revised: 11 July 2025

Accepted: 12 July 2025

Available Online: 25 July 2025

Keywords:

Lightning

Thunderstorm

Spatial Distribution

Geostatistics

Altitude / Topography

ABSTRACT

Lightning is a prominent atmospheric phenomenon, characterized by the transfer and discharge of electricity between clouds and the Earth's surface. This process poses significant risks to both human safety and the environment, thereby necessitating a detailed investigation of its climatological features. In addition to the electrical transfer, lightning is also accompanied by intense sound and light. Cloud formation typically begins at altitudes above the condensation level, where water droplets form below the zero-degree isotherm, and ice crystals develop above it. As these water droplets and ice crystals grow, they descend at an approximate rate of 8 meters per second. If the downward velocity of the particles is slower than the upward movement of the cloud, the droplets and crystals are subjected to continuous updrafts and downdrafts, resulting in repeated collisions. This process leads to the accumulation of larger particles and the separation of electrical charges, with negative charges concentrating at the base of the cloud and positive charges accumulating at the top. This study examines the statistical and geostatistical characteristics of lightning frequency across Iran from 2000 to 2022, using data from 382 synoptic stations. Descriptive statistics, including the mean and coefficient of variation, were computed for lightning events, and their correlations with geographic variables such as latitude, longitude, and altitude were assessed. Regression analysis was employed to model these relationships. The results reveal that the spatial distribution of lightning frequency in Iran follows a stochastic pattern, exhibiting significant annual variability. Among the spatial variables analyzed, latitude and longitude showed a stronger correlation with annual lightning frequency than altitude.

* Corresponding author: Hamzeh Alizadeh

E-mail address: hamzeh.alizadeh72@gmail.com

How to cite this article: Alizadeh, H., Asakareh, H., & Raispour, K. (2025). General Characteristics of the Lightning Phenomenon in Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 140-165. <https://doi.org/10.22067/geoech.2025.89265.1508>



©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

Lightning is a natural phenomenon that can be hazardous, claiming the lives of over two thousand people globally each year. It occurs predominantly in regions with variable climates and involves the transfer and discharge of electricity between clouds and the Earth's surface. This phenomenon has far-reaching consequences for both the environment and human society. For instance, lightning can ignite fires, cause financial losses, and result in fatalities when it strikes tall structures such as trees and buildings. It ranks second among atmospheric hazards in terms of mortality.

The occurrence of lightning on Earth is closely linked to climatic conditions, particularly temporal and spatial variations in solar radiation. The highest global frequency of lightning is found in the tropical regions of the Americas, Africa, and the oceans. Approximately 78% of lightning events occur between latitudes 30°S and 30°N. Satellite data indicates that lightning frequency is generally higher in tropical and humid climates. In coastal areas, lightning events account for about 70% of all oceanic lightning occurrences, with a higher frequency observed on the eastern coasts of continents compared to the western coasts. Consequently, the spatial distribution of lightning demonstrates considerable variability.

Lightning frequency tends to peak in the morning and afternoon, with a notable reduction during nighttime hours. Seasonal patterns also influence lightning occurrences, with the highest frequency generally observed in July. Studies conducted in Iran have identified diverse temporal and spatial patterns of lightning, with the highest frequency recorded in the northern regions of Khuzestan Province and the southern regions of Lorestan Province. In contrast, the central and flat interior areas exhibit lower lightning frequencies.

Material and Methods

Study Area

The study area encompasses mainland Iran, which spans an area of approximately 1,648,195 km², within the following geographic coordinates:

$$N : 24^{\circ} 40' - 39^{\circ} 46'$$

$$E : 44^{\circ} 00' - 63^{\circ} 19'$$

Data

Lightning frequency data from 2000 to 2022 were collected from 411 active synoptic stations across Iran. After reviewing the dataset, stations with insufficient records were excluded, leaving 382 stations with reliable data for analysis (Figure 1). Daily lightning event records were obtained from the Iranian Meteorological Organization (IRIMO) website (<https://data.irimo.ir/withoutlogin/index.aspx>).

An examination of station altitudinal distribution (Table 1) revealed that around 56% of stations (212) were located between 500 and 2000 meters, while only about 3% were situated in low-lying areas (-22 to 0 meters). The number of stations decreased at higher altitudes, with only one station located above 3000 meters.

This study investigates the long-term (climatic) frequency of lightning and its relationship with geographic coordinates (longitude, latitude) and altitude. Descriptive statistics, including the annual mean and coefficient of variation, were computed to characterize lightning events, and their spatial distribution was mapped.

Results and Discussion

General Characteristics

The highest frequency of lightning was observed in northwestern Iran. Precipitation in this region is primarily driven by convective activity, orographic uplift, and local fronts. Additionally, temperature and pressure contrasts induced by topography contribute to the frequency of lightning events.

In southern Iran, which has a hot and humid climate, the annual lightning frequency was found to be similar to that in the western regions. Stations in northern regions also recorded relatively high frequencies, consistent with their temperate and humid climate, which is conducive to lightning activity. The mean coefficient of variation across stations was approximately 25.5%. A value below 25.5 indicates relatively stable lightning occurrence, while higher values suggest more irregular patterns and strong year-to-year variability.

Probability Analysis

The highest probability of lightning occurrence was observed in the high and mountainous regions of the Zagros and Alborz mountain ranges. Factors contributing to this include the mountainous terrain, the frequent passage of air masses, and the uneven distribution of solar radiation on slopes, which promote atmospheric instability and convection.

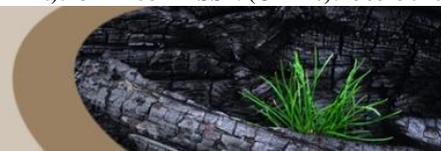
The western half of Iran, especially the northwest, lies along the path of various air masses (including westerlies, Mediterranean cyclones, and associated short waves) during the cold season, creating favorable conditions for thunderstorms. The northern regions also experience significant lightning activity due to the moisture from the Caspian Sea, considerable elevations, and the combined effects of migratory westerly systems and Siberian high-pressure systems. In addition to these regions, scattered areas across the country experience occasional lightning events.

Conclusion

Lightning is a natural phenomenon that occurs worldwide, especially in regions with variable climates such as Iran. Analyzing data from 2000–2022 reveals that geographic coordinates and elevation have a minimal linear effect on the distribution and frequency of lightning events. The coefficient of variation maps highlight irregular lightning occurrences and significant annual variations across the country.

Correlation analysis indicates weak linear relationships between geographic factors and lightning frequency. Latitude exhibits a slight positive correlation with lightning activity in the northern regions, while longitude shows a moderate negative correlation, with lightning frequency decreasing eastward. Overall, lightning in Iran follows a stochastic pattern, with no strong linear spatial association with geographic coordinates or altitude.

Satellite-based monitoring, such as the Lightning Imaging Sensor (LIS) on the TRMM satellite, offers near-real-time and accurate coverage, complementing station-based measurements. Future studies should incorporate satellite data to more effectively capture the temporal and spatial distribution of lightning, thereby providing a comprehensive understanding of this phenomenon across Iran's diverse climatic regions.



مشخصات عمومی پدیده رعدوبرق در ایران

حمزه علی‌زاده^{۱*}، حسین عساکره^۲، کوهزاد رئیس‌پور^۳

^۱ دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۲ استاد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۳ استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله:	رعدوبرق، به‌عنوان یکی از پدیده‌های مهم جوی - طبیعی، با انتقال الکتریسته و تخلیه برق بین ابرها و زمین می‌تواند توأم با اثرات مثبت (نظیر تاثیر بر فرایندهای زیستی) و منفی (نظیر مخاطراتی برای انسان و محیط زیست) باشد. بنابراین، شناخت عمیق از ویژگی‌های اقلیم‌شناختی این پدیده از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه، جنبه‌هایی از این ویژگی‌ها شامل فراوانی رویدادهای رعدوبرق سالانه بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ در ۳۸۲ ایستگاه همدیدی ایران جمع‌آوری و تحلیل شد. با استفاده از این داده‌ها، برخی ویژگی‌های توصیفی (نظیر میانگین و ضریب تغییرات) فراوانی رخداد رعدوبرق و نیز ارتباط (همبستگی) آن با مختصات جغرافیایی (طول و عرض جغرافیایی) و ارتفاع، محاسبه، برآورد و بررسی شد. برای الگوسازی این روابط از روش‌های رگرسیونی استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که توزیع مکانی فراوانی رخداد رعدوبرق در ایران فرایندی بی‌نظم و با تغییرات سال‌به‌سال شدید است. از میان متغیرهای مکانی (مختصات جغرافیایی و ارتفاع)، طول و عرض جغرافیایی رابطه‌ی نسبتاً قوی‌تری را با فراوانی سالانه رخداد رعدوبرق ایران نشان می‌دهند. مناطق مختلف ایران، احتمال وقوع رعدوبرق متفاوتی دارند که با عواملی همچون جغرافیا و شرایط آب و هوایی مرتبط است. مناطقی مانند شمال غرب و جنوب شرق ایران بیشترین میزان وقوع را دارند، در حالی که مناطق دیگر در اولویت‌های بعدی قرار می‌گیرند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱	
کلمات کلیدی:	
رعدوبرق	
طوفان تندی	
توزیع مکانی	
زمین آمار	
ارتفاع/ توپوگرافی	

مقدمه

پدیده رعدوبرق یکی از پدیده‌های طبیعی، بعضاً توأم با مخاطره است که در سطح جهان سالانه جان بیش از دو هزار نفر را گرفته و به ویژه در مناطق با اقلیم متغیر رخ می‌دهد. کلینیک و برینگر (Kilinc & Beringer, 2007)، این پدیده همراه با انتقال و تخلیه الکتریسته بین ابرها و زمین، پیامدهای متعددی دارد (Adhikari, 2023). در فرایند تشکیل ابر و حرکات قائم همراه با آن اولاً قطرات و بلورها درشت‌تر می‌شوند و ثانیاً دو قطب الکتریکی منفی (در قطرات و بلورهای پایین ابر) و مثبت (در قطرات و بلورهای ریز بالای ابر)، ایجاد و به رعدوبرق منجر می‌شود (Kaviani & Alijani, 2004).

این پدیده دارای اثرات مختلفی بر محیط زیست و انسان‌ها است. به‌عنوان مثال، رعدوبرق در برخورد با اشیاء بلند، مانند درختان و ساختمان‌ها می‌تواند آتش سوزی، خسارات مالی و جانی به همراه داشته باشد. این پدیده در میان مخاطرات جوی، دومین رتبه را به لحاظ میزان مرگ و میر دارد. رعدوبرق علاوه بر خطرات مستقیم، از راه‌های غیرمستقیم بر جامعه انسانی نیز تأثیر می‌گذارد. این پدیده یکی از عوامل اصلی تخریب درختان و جنگل‌ها است. از مجموع رعدوبرق‌هایی که در ترازهای بالای جو رخ می‌دهد، حدود ۲۰ درصد از آن‌ها به زمین می‌رسد و سالانه حدود ۲۴۰۰ کشته در سطح جهان به دنبال دارد و صدمات زیادی ایجاد می‌کند (Shindo, Matsubara, Suda & Miki, 2012).

رعدوبرق در کره زمین، با آب و هوای زمین، به ویژه تحت تأثیر تباین‌های زمانی - مکانی تابش رسیده از خورشید، رابطه مستقیم نشان داده است (Mofokeng, Adelabu, Adepoju & Adam, 2019). از این رو، این باور وجود دارد که فراوانی رخداد و فعالیت رعدوبرق تحت تأثیر عوامل مکانی (نظیر موقعیت جغرافیایی، ارتفاع و توپوگرافی) به طور همسان در کره زمین توزیع نشده است. عوامل مکانی (نظیر موقعیت جغرافیایی، ارتفاع و توپوگرافی) به طور همسان در کره زمین توزیع نشده است (Thomson, 1980; Rasuli, Khorshiddoust & Fakhari Vahed, 2018; Gao et al., 2022). علاوه بر این، گرمایش روزانه و فصلی سطح زمین نوسانات شدید دما را در پی دارد و در نهایت بر ناپایداری جوی و شکل‌گیری گسترش طوفان‌های توأم با رعدوبرق تأثیر می‌گذارد. از این رو گفته می‌شود که رخداد رعدوبرق در مقیاس‌های زمانی کوتاه با شرایط سطح زمین، از جمله دماهای سطحی نیز مرتبط است و از رویدادهای قابل تأمل در ارتباط با پیامدهای گرمایش جهانی است (Price, 2009). بدین دلیل شناخت روابط زمانی - مکانی رعدوبرق از مسائل پیش روی اقلیم‌شناسان به شمار می‌آید.

توزیع جهانی بیشینه رخداد رعدوبرق در سه ناحیه گرمسیری قاره آمریکا، آفریقا و اقیانوس‌ها است. حدود ۷۸ درصد از رخداد این پدیده بین ۳۰ درجه عرض جنوبی تا ۳۰ درجه عرض شمالی کره زمین رخ می‌دهد. تحلیل داده‌های ماهواره‌ای نشان می‌دهد در مناطق استوایی و مناطق با آب و هوای مرطوب‌تر معمولاً فراوانی رعدوبرق بیشتر است. رویداد رعدوبرق در مناطق ساحلی تقریباً ۷۰ درصد از کل رعدوبرق اقیانوس‌ها را به خود اختصاص داده و وقوع آن در سواحل شرقی قاره‌ها بیشتر از سواحل غربی رخ می‌دهد. بنابراین، توزیع مکانی رعدوبرق گویای تباین قابل توجه مکانی است. بیشینه رعدوبرق اغلب در صبح و بعد از ظهر و کمینه آن در شب اتفاق می‌افتد. محل رخداد رعدوبرق نیز تحت تأثیر فصول مختلف، متفاوت است. تغییرات ماهانه رعدوبرق نشان می‌دهد که بیشترین فعالیت رعدوبرق در ماه جولای رخ می‌دهد. گودمن و همکاران (Goodman et al., 2013)، رافی و مصطفی (Rafi & Mostafa, 2022)، کاپلان و لو (Kaplan & Lau, 2021)، کاپلان و لو (Kaplan & Lau, 2022)، فیشر و همکاران (Fischer et al., 2024)، آنیزی و همکاران (Aniezi et al., 2024)، تاسارک و همکاران (Taszarek et al., 2019) نشان دادند که مناطق مدیترانه مرکزی، کوه‌های آلپ و شبه‌جزیره بالکان بیشترین فراوانی رعدوبرق را در اروپا به ویژه در ماه‌های ژوئیه و اوت دارند. همچنین، تعداد روزهای رعدوبرق در کوه‌های آلپ و شرق اروپا افزایش یافته، در حالی که در جنوب غربی کاهش یافته است. گائو و همکاران (Gao et al., 2022) ارتباط بین فراوانی انتقال رعدوبرق ابر به زمین را با عوامل توپوگرافی در استان یوننان چین بررسی کردند و دریافتند که توپوگرافی نقش مهمی در ویژگی‌های رعدوبرق منطقه‌ای ایفا می‌کند. رسولی و همکاران (Rasouli et al., 2018) در مطالعه رابطه

رعدوبرق با ارتفاع از سطح دریا نشان دادند که فراوانی رعدوبرق در دامنه‌های جنوبی ناحیه شمال غرب ایران بیشتر است، به طوری که بیشینه فراوانی رعدوبرق در دامنه‌های جنوبی و در ارتفاع بین ۷۰۰ تا ۱۲۰۰ متر قرار دارد.

مطالعات انجام شده در نواحی مختلف کشور نشان داد که پدیده رعدوبرق با الگوهای زمانی - مکانی متنوعی رخ می‌دهد. براساس بررسی‌های صورت گرفته توسط خورشید دوست و همکاران (Khorshiddoust, Rasouly & Fakhari Vahed, 2017) فراوانی رعدوبرق ایران در ماه‌های می و آوریل بیشینه و در ماه‌های ژانویه و سپتامبر کمینه بود. علاوه بر این، بیشینه فراوانی رعدوبرق بین ساعات ۱۲:۳۰ تا ۲۰:۳۰ و کمینه فراوانی بین ساعات ۳:۳۰ تا ۹:۳۰ مشاهده شد. همچنین مناطق شمال استان خوزستان و جنوب استان لرستان دارای بیشترین فراوانی رعدوبرق بوده و مناطق مرکزی و هموار داخلی کشور دارای کم‌ترین فراوانی رعدوبرق بوده‌اند. رسولی و همکاران (Rasouli et al., 2018) نیز نشان دادند که بیشینه فراوانی رعدوبرق در ماه‌های مارس تا آگوست مشاهده شده و تغییرات روزانه فعالیت‌های رعدوبرقی، در بازه زمانی ساعات ۱۳ تا ۱۶ (به وقت محلی) به صورت معنی‌داری افزایش می‌یابد. جوان و عزیززاده (Javan & Azizzade, 2018). با بررسی رعدوبرق شمال غرب ایران در ماه‌های آوریل، می، ژوئن و ژوئیه در ۱۹ ایستگاه همدید نشان دادند که احتمال وقوع رعدوبرق در بخش‌های مرکزی و شمال غربی این منطقه بیشتر است در حالی که در مناطق جنوبی و شمال شرقی کم‌تر است. در پژوهشی دیگری که توسط اسماعیلی محمودآبادی و صادقی (Esmaeili Mahmoudabadi & Sadeghi, 2023) در بازه زمانی یازده ساله (۲۰۱۶ - ۲۰۰۶) روی ایران انجام گرفت، نشان دادند که بیشینه رعدوبرق ایران عمدتاً در استان‌های شمال و شمال غرب و کمینه آن در بخش‌های مرکزی و جنوب شرقی رخ می‌دهد.

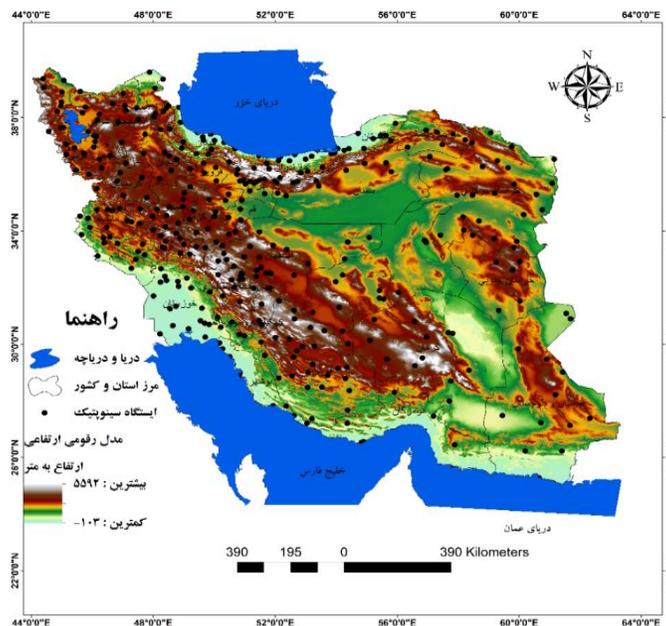
بنابراین به دلیل پیامدهای مستقیم و غیرمستقیم حاصل از پدیده رعدوبرق، شناخت ویژگی‌های آن به‌عنوان یکی از مخاطرات اقلیمی بسیار ضروری است. همچنین مطالعه این پدیده، ضمن فهم الگوی زمانی - مکانی آن، می‌تواند ما را در آگاهی بخشی، محافظت و حتی مدیریت آن یاری دهد. بنابراین هدف اصلی پژوهش حاضر، علاوه بر فهم الگوی رفتار زمانی - مکانی رعدوبرق، برآورد و پهنه‌بندی این رویداد در گستره ایران جهت اتخاذ تدابیر و اعمال مدیریت مناسب و متناسب است. بر همین اساس، این تحقیق می‌تواند به پر کردن خلأهای موجود به ما کمک نماید تا در مواجهه با آسیب‌پذیری از پدیده رعدوبرق، اتخاذ راهکارهای دقیق و علمی برای شناسایی خطرات و تهدیدهایی که این رویداد ممکن است به همراه داشته باشند، صورت گیرد. جهت دستیابی به اهداف مطرح شده، به بررسی و تحلیل ویژگی‌های عمومی (نظیر میانگین و ضریب تغییرات) فراوانی رخداد رعدوبرق در سراسر ایران پرداخته شد تا الگوهای زمانی - مکانی موجود در کشور، براساس داده‌ها و روش‌های متفاوت از گذشته شناسایی شده و درک بهتری از ویژگی‌های زمانی - مکانی رعدوبرق در سطح کشور به دست آید. بدین منظور از داده‌های روزانه تعداد ۳۸۲ ایستگاه همیدیدی در بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۰۰ و نیز روش‌های آماری - احتمالاتی برای واکاوی داده‌ها، استفاده شد.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، گستره سرزمین اصلی ایران با مساحتی حدود ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع در چارچوب مختصات زیر است (شکل ۱):

$N : 24^{\circ} 40' - 39^{\circ} 46'$

$E : 44^{\circ} 00' - 63^{\circ} 19'$



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه و توزیع مکانی ایستگاه‌های منتخب

Fig.1. Study area and spatial distribution of selected stations

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، فراوانی رویدادهای رعدوبرق بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ در ۳۸۲ ایستگاه همدیدی در سراسر ایران جمع‌آوری شد. شکل ۱ توزیع مکانی این ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. در این مطالعه، فراوانی رخداد‌های روزانه رعدوبرق در فاصله زمانی ۲۰۰۰/۰۱/۰۱ تا ۲۰۲۲/۱۲/۳۱ برای ۳۸۲ ایستگاه از تارنمای سازمان هواشناسی کشور (IRIMO: <https://data.irimo.ir/withoutlogin/index.aspx>) استخراج شد. لازم به ذکر است تعداد ایستگاه‌ها طی دوره مورد مطالعه افزایش یافتند (جدول ۱).

بررسی توزیع ارتفاعی ایستگاه‌ها (جدول ۱) نشان داد که حدود ۵۶ درصد ایستگاه‌ها (۲۱۲ ایستگاه) در ارتفاع ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر و حدود ۳ درصد از ایستگاه‌ها در نواحی کم ارتفاع یعنی ۲۲- تا ۰ متر قرار دارند. از ارتفاع ۲۰۰۰ متر به سمت مناطق مرتفع (۲۵۰۰ تا ۳۵۰۰ متر)، از تعداد ایستگاه‌ها کاسته می‌شد، به طوری که از ارتفاع ۳۰۰۰ متر به بالا فقط یک ایستگاه وجود داشت. با تقسیم کشور به چهار ربع، توزیع جغرافیایی ایستگاه‌ها در این ربع‌ها نیز بررسی شد (جدول ۱). در ربع دوم (شمال‌غرب)، بیشینه سهم ایستگاه‌ها با ۵۰ درصد و ربع چهارم (جنوبی‌شرقی) و اول (شمال‌شرقی) به ترتیب ۲۱ و ۲۰ درصد ایستگاه‌ها را به خود اختصاص دادند، یعنی حدوداً بیش از ۹۰ درصد ایستگاه‌ها در این سه ربع قرار داشتند و ربع سوم (جنوب‌غربی) نیز با ۳۴ ایستگاه، حدود ۹ درصد ایستگاه‌های کشور را دارا بود.

جدول ۱- برخی مشخصات زمانی - مکانی ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 1- Some temporal-spatial characteristics of the studied stations

توزیع زمانی تعداد ایستگاه‌های مورد مطالعه							
Time distribution of the number of stations studied							
تعداد ایستگاه	سال	تعداد ایستگاه	سال	تعداد ایستگاه	سال	تعداد ایستگاه	سال
Number of stations	Year	Number of stations	year	Number of stations	Year	Number of stations	Year
367	2018	345	2012	273	2006	172	2000
371	2019	349	2013	289	2007	180	2001
376	2020	347	2014	304	2008	191	2002
375	2021	351	2015	315	2009	210	2003
377	2022	361	2016	318	2010	225	2004
		366	2017	328	2011	239	2005
توزیع ارتفاعی ایستگاه‌های مورد مطالعه							
Altitude distribution of the studied stations							
تعداد ایستگاه				فاصله‌ی طبقات ارتفاعی (به متر)			
Number of stations				Distance between floors (in meters)			
11				-22 - 0			
73				0 - 500			
55				500 - 1000			
113				1000 - 1500			
99				1500 - 2000			
28				2000 - 2500			
2				2500 - 3000			
0				3000 - 3500			
1				3500 - +3500			
پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه در چهار ربع کشور							
Distribution of study stations in the four quadrants of the country							
تعداد ایستگاه (به درصد)	تعداد ایستگاه	مختصات جغرافیایی	مناطق جغرافیایی				
Number of stations (in percent)	Number of stations	Geographic coordinates	Geographic coordinates				
21 درصد 21 percent	80	N: 32° 00-39° 46 E: 52° 00-63° 19	ربع اول (شمالشرق) First quadrant (northeast)				
50 درصد 50 percent	191	N: 32° 00-39° 46 E: 44° 00-52° 00	ربع دوم (شمالغرب) Second quadrant (northwest)				
9 درصد 9 percent	34	N: 44° 40-32° 00 E: 44° 00-52° 00	ربع سوم (جنوبغرب) Third quadrant (southwest)				
20 درصد 20 percent	77	N: 24° 40-32° 00 E: 52° 00-63° 19	ربع چهارم (جنوبشرق) Fourth quadrant (southeast)				

جدول ۲- کدهای مربوط به پدیده رعدوبرق

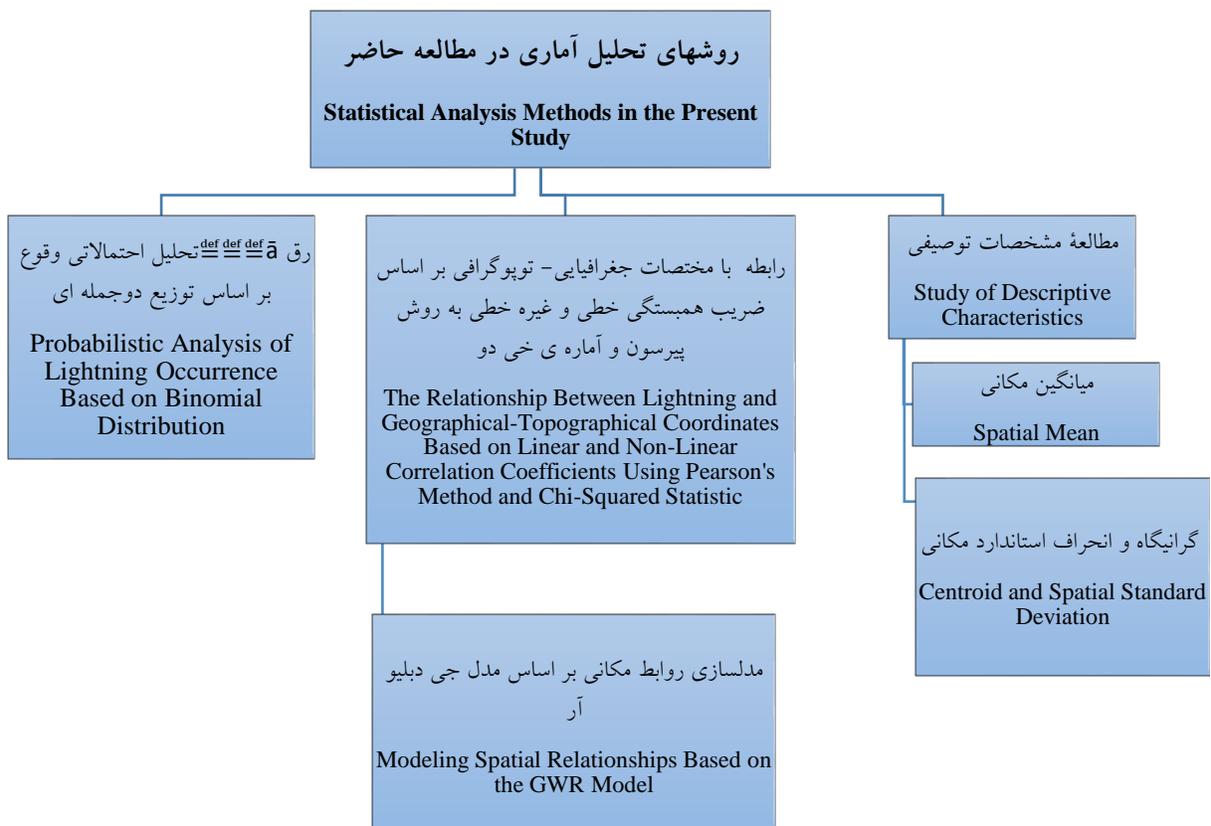
Table 2- Codes related to the lightning phenomenon (Lashkari, 2011)

تعریف کد Code definition	کد پدیده Phenomenon code	تعریف کد Code definition	کد پدیده Phenomenon code
توفان رعدوبرق در زمان دیده بانی (توفان رعدوبرق، سبک یا متوسط بدون تگرگ، اما همراه با باران یا برف در زمان دیده‌بانی) Thunderstorm during watch (light or moderate thunderstorm without hail, but with rain or snow during watch)	95	برق مشاهده شده، ولی رعد شنیده نشده است. Lightning was seen, but thunder was not heard.	13
توفان رعدوبرق در زمان دیده بانی (توفان رعدوبرق، سبک یا متوسط همراه با تگرگ، و در زمان دیده‌بانی) Thunderstorm during watch (light or moderate thunderstorm with hail, and during watch)	96	توفان رعدوبرق (همراه یا بدون بارش) Thunderstorm (with or without precipitation)	29
توفان رعدوبرق در زمان دیده بانی (توفان رعدوبرق سنگین، بدون تگرگ، اما همراه با باران یا برف در زمان دیده‌بانی) Thunderstorm during watch (severe thunderstorm, without hail, but with rain (or snow during watch)	97	توفان رعدوبرق در طول ساعت قبلی، اما در زمان دیده‌بانی پدیده مشاهده نشده است (باران سبک در موقع مشاهده ابر CF) Thunderstorm during the previous hour, but not observed at the time of observation (light rain at the time of observation of the CF cloud)	91
توفان رعدوبرق در زمان دیده بانی (توفان رعدوبرق همراه با گرد و غبار یا توفان ماسه در زمان دیده‌بانی) Thunderstorm during watch time (thunderstorm accompanied by dust or sandstorm during watch time)	98	توفان رعدوبرق در طول ساعت قبلی، اما در زمان دیده‌بانی پدیده مشاهده نشده است (باران متوسط یا سنگین در زمان دیده‌بانی) Thunderstorm during the previous hour, but no thunderstorms were observed during the observation period (moderate or heavy rain during the observation period)	92
توفان رعدوبرق در زمان دیده بانی (توفان رعدوبرق، سنگین، همراه با تگرگ در زمان دیده‌بانی) Thunderstorm during watch (Thunderstorm, heavy, with hail during watch)	99	توفان رعدوبرق در طول ساعت قبلی، اما در زمان دیده‌بانی پدیده مشاهده نشده است (برف سبک، یا مخلوط برف و باران یا تگرگ در زمان دیده‌بانی) Thunderstorm during the previous hour, but no phenomenon observed during the observation period (light snow, or mixed snow and rain, or hail during the observation period)	93
		توفان رعدوبرق در طول ساعت قبلی، اما در زمان دیده‌بانی پدیده مشاهده نشده است (برف متوسط یا سنگین یا مخلوط برف باران یا تگرگ در زمان دیده‌بانی) Thunderstorm during the previous hour, but no phenomenon was observed during the observation period (moderate or heavy snow or mixed snow, rain or hail during the observation period)	94

در این پژوهش از داده‌های روزانه رعدوبرق ایستگاه‌های همدیدی برای تعیین فراوانی این پدیده در گستره ایران زمین استفاده شد. تعداد رعدوبرق‌ها در ایستگاه‌های همدیدی با کدهای ۱۳، ۱۷، ۲۹، و ۹۱ تا ۹۹ ثبت می‌شود (جدول ۲). فراوانی روزانه رعدوبرق براساس فراوانی تعداد کدهای روزانه استخراج شد. روزهای فاقد داده در تمام ایستگاه‌ها، شناسایی و محاسبات بدون در نظر گرفتن این مقادیر (بدون بازسازی آماری) انجام شد. داده‌های روزانه رخداد رعدوبرق به صورت سری‌های زمانی روزانه برای هر یک از ایستگاه‌ها آماده شد. به فراخور تحلیل‌های مورد نظر، فراوانی رعدوبرق، به سری‌های زمانی ماهانه و سالانه تبدیل شد.

روش تحقیق

این پژوهش به منظور بررسی درازمدت (اقلیمی) فراوانی رخداد رعد و برق و رابطه آن با مختصات جغرافیایی (طول و عرض) و ارتفاع انجام شده است. برای دستیابی به این هدف ابتدا برخی مشخصات توصیفی رعدوبرق (شامل میانگین سالانه و ضریب تغییرات) محاسبه و برآورد گردید و توزیع مکانی این مقادیر در نقشه‌هایی ارائه شد. روندنمای مطالعه حاضر در شکل ۲ آمده است:



شکل ۲- روند نمای مطالعه حاضر

Fig. 2. Flowchart of the Present Study

از سوی دیگر، توزیع جهت‌دار به معنای وجود یک روند فضایی در عوارض واقع در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. وجود روند معمولاً با یک بیضی شماتیک با عنوان بیضی انحراف استاندارد نشان داده می‌شود که قطر بزرگ آن نمایانگر جهت توزیع می‌باشد (Rahman, Yang & Di, 2018).

برای شناسایی گرانیگاه توزیع فضایی مشاهدات، مرکز میانگین برآورد گردید. مرکز میانگین، نقطه‌ای در یک نقشه است که از آن

به منظور خلاصه‌سازی توزیع پدیده‌ها استفاده می‌شود. این آمار مرسوم‌ترین سنجه گرایش مرکزی برای داده‌های فضایی است که به صورت یک نقطه ارائه می‌شود. از این رو مختصات جغرافیایی مکان همچون طول (x)، عرض (y) اهمیت پیدا می‌کند (Wong & Wang, 2018). برای محاسبه مرکز میانگین، یک شبکه مختصات، با تعدادی مساوی از محورهای افقی و عمودی بر روی نقشه مورد نظر قرار داده می‌شود. به این ترتیب می‌توان مختصات هریک از نقاط را به دست آورد. در صورتی که مختصات نقطه i با (x_i و y_i) و ارزش عددی وابسته به این نقطه با p_i نشان داده شود، مختصات مرکز میانگین با \bar{X}_c و \bar{Y}_c نشان داده و از روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شود.

$$\bar{X}_c = \frac{\sum_{i=1}^n P_i X_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

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

جهت‌گیری مکانی (محدوده تغییر احتمالی) میانگین و محدوده پراکندگی متوسط آن با یک بیضی با عنوان بیضی انحراف استاندارد نشان داده می‌شود. مختصات کشیدگی این بیضی (S_x و S_y) براساس تعداد ایستگاه‌ها (n) مختصات ایستگاه (x_i و y_i) و مختصات مرکز میانگین (\bar{X}_c و \bar{Y}_c) از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شود (Vahidi Asl, 2011).

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_c)^2} \quad (3)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_c)^2} \quad (4)$$

برای برآورد روابط بین متغیرهای مورد بررسی، با استفاده از روش‌های آماری همبستگی (خطی و غیرخطی؛ کمی و طبقه‌ای) میانگین سالانه و ضریب تغییرات آن با مختصات جغرافیایی (طول و عرض) و ارتفاع محاسبه و برآورد شد. در نهایت تلاش شد که این روابط در خانواده روش‌های رگرسیونی، الگوسازی شوند:

از آن‌جا که روابط متغیرهای اقلیمی همیشه به شکل خطی نیستند، از روش‌های غیر خطی محاسبه همبستگی استفاده شد. در این راستا از تبدیل شبه نرمال باکس-کاکس استفاده شد. این روش از نوع تبدیل‌های توانی است و معمولاً برای مشاهدات نامنفی (بیش از صفر) به کار می‌رود. تبدیل باکس - کاکس به شکل رابطه (۵) انجام می‌شود (Asakereh, 2011):

$$\frac{x^\lambda - 1}{\lambda} \quad -3 \leq \lambda \leq +3 \quad (5)$$

در این پژوهش، با استفاده از رابطه (۵) تمامی تبدیلات ممکن برای هر جفت متغیر (میانگین فراوانی رعدوبرق و ضریب تغییرات آن با مختصات جغرافیایی و ارتفاع) در دامنه ۳ تا -۳ با نمو ۰/۱ برای λ انجام شد. جایگشت تمام داده‌ها (میانگین فراوانی و ضریب تغییرات آن با مختصات جغرافیایی و ارتفاع) در تمامی حالات ممکن بررسی شدند. در نهایت برای ۳۸۴۳ حالت همبستگی‌ها محاسبه شد. هدف از انجام این محاسبات یافتن بهترین همبستگی بین هر جفت متغیر بود. قوی‌ترین همبستگی در هر یک از حالات مشخص شد. با محاسبه ضریب تعیین می‌توان درصد تغییرات (پراش) توأم (مشترک) دو متغیر (x و y) را برآورد کرد. این ضریب مجذور ضریب همبستگی دو متغیر است و می‌توان آن را به شکل درصد نشان داد (Asakereh, 2011). اگرچه روش باکس - کاکس برای تبدیل داده‌ها و شناسایی الگوهای غیرخطی پیچیده مناسب است، اما نتایج حاصل از روش غیرخطی نشان داد که ضریب همبستگی به طور قابل توجهی تغییر نکرد. بنابراین، استفاده از روش پیچیده‌تر، نتایج مشابهی به دست آمد. از این‌رو، و براساس اصل امساک، تحلیل خطی به‌عنوان روشی مناسب برای بررسی ارتباط بین داده‌ها انتخاب گردید.

آزمون ساده و پرکاربرد خی دو^۱ یکی از مهم‌ترین آزمون‌های ناپارامتری برای ارزیابی استقلال حالات دو متغیر است و از رابطه (۶) قابل برآورد است (Asakereh, Masoodian & Tarkarani, 2021):

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (E_{ij} - O_{ij})^2}{E_{ij}} \quad (۶)$$

در این فرمول χ^2 مقدار کای دو، O_{ij} تعداد مشاهدات واقعی هر دسته، E_{ij} تعداد مشاهدات مورد انتظار هر دسته می‌باشد. برای بررسی بسامد رویداد رعدوبرق از تحلیل‌های احتمالاتی استفاده شد. در این زمینه و براساس روش‌های آزمون و خطا، توزیع دوجمله به‌عنوان توزیع مناسب و برازنده بر مشاهدات تشخیص داده شد. توزیع دوجمله‌ای، قادر است توزیع احتمالاتی تعداد رخدادها در یک فرایند مستقل را شبیه‌سازی و مدل‌سازی کند و از رابطه (۷) قابل برآورد است (Asakereh, 2011):

$$p(X = x) = \binom{p}{x} p^x q^{n-x} = \frac{n!}{x!(n-x)!} p^x q^{n-x} \quad (۷)$$

در این رابطه $P(X=x)$ احتمال وقوع x رویداد از متغیر X می‌باشد، n تعداد کل رویدادها با تکرار، P احتمال رخداد و q احتمال عدم رخداد است.

در این راستا با استفاده از روش بیشینه درستنمایی، احتمال رخداد رعدوبرق محاسبه و براساس رابطه (۷) توالی و تداوم رعدوبرق برآورد شد.

تحلیل روابط مکانی رعدوبرق با استفاده از روش رگرسیون جغرافیایی موزون (GWR)^۲ انجام شد. این روش یک روش آماری-محلی است که اساس آن بر پایه قانون جغرافیایی «اصل نزدیکی همانندی» می‌باشد. این روش در تحلیل‌های مکانی بسیار مناسب و با دقت بالایی از واقعیت‌های محیطی برآورد و الگوسازی را به انجام می‌رساند. بر این اساس، با استفاده از مدل‌های رگرسیونی چند متغیره و بر پایه موقعیت نقاط مجاور و وزن‌دهی آماری به هریک از آنها الگوسازی انجام می‌شود، (Asakere & Seifipour, 2012). برای الگوسازی مکانی رابطه بین میانگین فراوانی رخداد رعدوبرق با مختصات جغرافیایی (طول و عرض جغرافیایی-ارتفاع)، از روش رگرسیون جغرافیایی موزون (GWR) استفاده شد. به هر متغیر مستقل متناسب با موقعیت جغرافیایی یک وزن اختصاص داده شد. این وزن‌ها نشان‌دهنده اهمیت نسبی هر متغیر مستقل در مدل رگرسیونی هستند. در این روش، به دلیل وجود همبستگی میان متغیرهای توضیحی، نتایج قابل قبولی به دست نیامد. بنابراین، از پارامترهای موجود به طور مستقل از عرض جغرافیایی و ارتفاع، و همچنین از طول جغرافیایی و ارتفاع، با میانگین سالانه رعدوبرق، دو نقشه تهیه گردید. مدل ارائه شده برای این رابطه به شرح رابطه (۸) است:

$$R_i = b_0(\phi_i, \lambda_i) + \sum_{k=1}^k b_k(\phi_i, \lambda_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (۸)$$

در مدل رگرسیونی موزون R_i متغیر وابسته، $b_0(\phi_i, \lambda_i)$ که به مختصات جغرافیایی (ϕ_i, λ_i) وابسته است که همان عرض از مبدأ می‌باشد. $b_k(\phi_i, \lambda_i)$ ضرایب رگرسیون برای متغیرهای مستقل X_k که به مختصات جغرافیایی (ϕ_i, λ_i) وابسته است، x_{ik} : k متغیرهای مستقل برای مشاهده i ، ε_i خطای تصادفی می‌باشند (Lu, Charlton, Harris & Fotheringham, 2014).

1- χ^2

2- Geographically Weighted Regression

نتایج و بحث

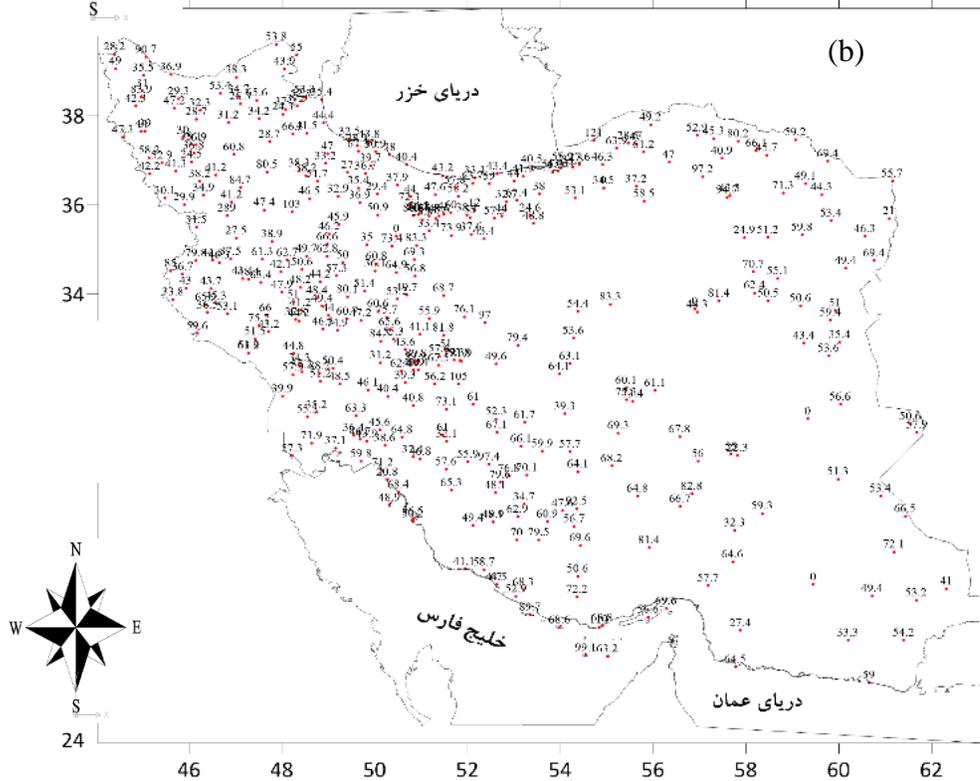
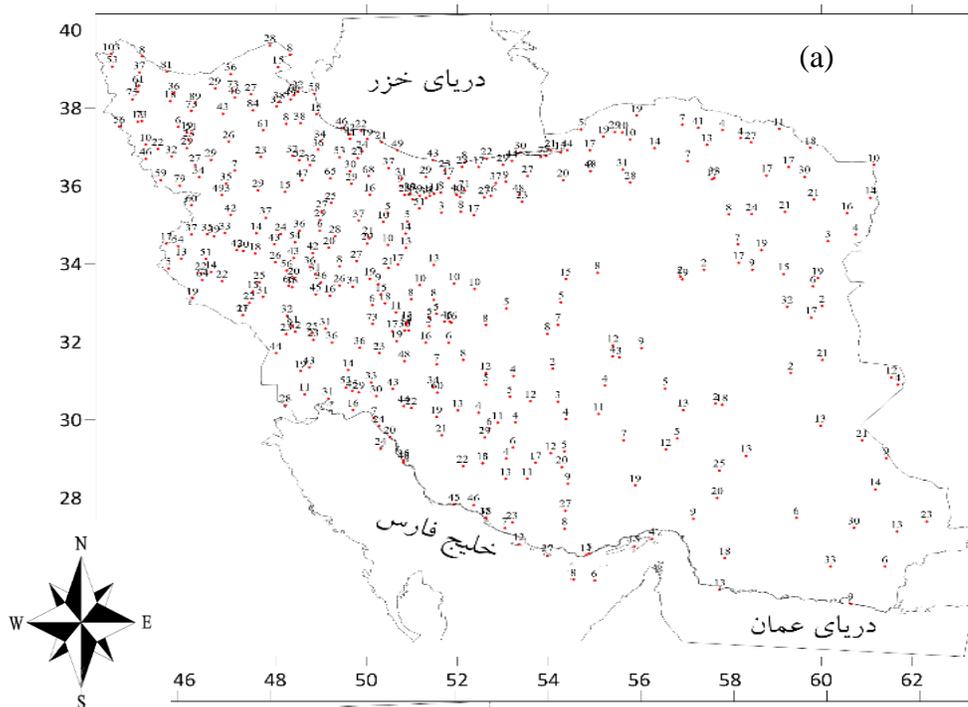
ویژگی‌های عمومی

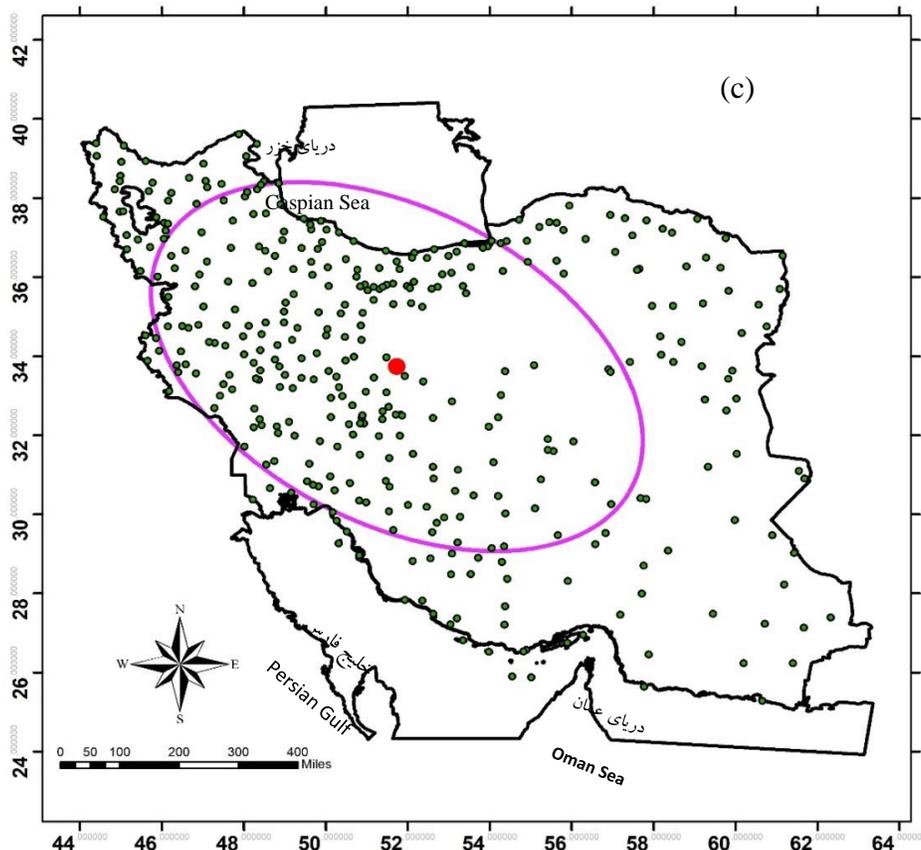
شکل ۳ توزیع مکانی میانگین (a)، ضریب تغییرات (b) و مرکز میانگین - بیضی استاندارد (c) سالانه فراوانی رعدوبرق را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۳ (a) می‌توان دید، بیشینه رخداد رعدوبرق در شمال غربی ایران رخ داد. بنا بر نظر عساکره و رزمی قلندری (Asakere & Razmi Qalandari, 2014)، بارش‌های شمال غرب کشور ایران عمدتاً حاصل فعالیت‌های همرفتی، صعود کوهستانی و جبهه‌های محلی است. همچنین این ناحیه با اختلافات دمایی و فشاری قوی‌تر حاصل از تباین‌های توپوگرافیک مواجه است. بنا بر نظر عساکره و همکاران (Asakereh et al., 2020)، تباین الگوهای فشار تراز دریا حاصل حضور پرفشار سیبری و کم‌فشارهای دیگر است. همچنین، حضور پشته غربی، ضمن ریزش هوای سرد به داخل ناوه مستقر بر منطقه، شرایط برخورد هوای سرد شمال اروپا و هوای گرم‌تر مدیترانه شرقی و شکل‌گیری جبهه‌ها را فراهم می‌کند. از این رو این ناحیه از کشور شرایط جوی مناسبی برای رخداد رعدوبرق را تجربه می‌کند.

میانگین سالانه فراوانی رخداد رعدوبرق در نواحی جنوبی ایران با اقلیم گرم و مرطوب، تقریباً نزدیک به میانگین سالانه فراوانی رخداد رعدوبرق در مناطق غربی بود. عوامل مرتبط با احتمال رخداد رعدوبرق در یافته‌های فتاحی و حجازی‌زاده (Fattahi & Hejazizadeh, 2006) توصیف شده است. ایشان وجود یک پرفشار در سطح زمین مستقر بر روی دریای عمان و شرق شبه‌جزیره عربستان را توأم با ریزش هوای گرم و مرطوب دریای عمان به سوی جنوب غربی ایران را پربسامدترین الگوی جوی می‌دانند. میانگین سالانه رعدوبرق، ایستگاه‌های شمال کشور، نسبتاً بالا است. این مناطق دارای آب و هوای معتدل و مرطوب هستند، که شرایط مطلوبی برای ایجاد این پدیده فراهم می‌کند. بنابر نظر مرادی (Moradi, 2004)، فرابار سیبری، سیستم‌های کم فشار و واچرخندهای مهاجر، الگوهایی هستند که شمال ایران را تحت تاثیر قرار می‌دهند. بارش‌های فرابار سیبری از دریای خزر، کم فشارها و واچرخندهای مهاجر از منابع دیگر (نظیر دریای سیاه، مدیترانه یا اقیانوس اطلس) رطوبت می‌گیرند. هرگاه در ساحل جنوبی دریای خزر، در سطح زمین پشته پرفشار کوتاه ناشی از گسترش هوای سرد در منطقه استقرار یابد و در ترازهای میانی و بالایی جو نیز ناوه وجود داشته باشد، شرایط لازم برای وقوع بارش‌های شدید و نیز فعالیت‌های رگباری - رعدوبرق در منطقه مهیا می‌شود. علاوه براین، در دامنه‌های شمالی البرز و کوهپایه‌های این ناحیه به ویژه در نواحی شرقی، بارش‌های همرفتی که از صفات اقلیمی نواحی مذکور هستند، نیز از عوامل شکل‌گیری تندر در این ناحیه است (Alizadeh-Choobari & Najafi, 2018).

میانگین سالانه رعدوبرق در ایستگاه‌های شرق کشور، نسبتاً کم‌تر از سایر مناطق است. آب و هوا در شرق ایران بیشتر خشک یا نیمه خشک است، با شرایط نیمه گرمسیری، در این منطقه با وجود برخی ناهمواری‌های زمین، شرایط برای ایجاد رعدوبرق به سختی فراهم می‌شود.

مناطق مرکزی ایران دارای اقلیم خشک و کم باران هستند، میانگین سالانه کم‌تری نسبت به کل ایران نشان می‌دهند؛ زیرا شرایط آب و هوایی مناسب برای تشکیل ابرهای تندری کم است. بنابر نظر علیجانی (Alijani, 1995) توده‌های هوای مرطوب (دریای مدیترانه‌ای - خزری) پس از تخلیه بخار آب در غرب کوه‌های زاگرس و شمال کوه‌های البرز به این ناحیه می‌رسند. در تابستان نیز این ناحیه محل استقرار پرفشار جنب حاره‌ای است و ناهمواری‌های شرقی از ورود رطوبت احتمالی خلیج بنگال و کوه‌های زاگرس جنوبی و بشاگرد از ورود رطوبت دریای عمان و خلیج فارس جلوگیری می‌کنند. از این رو شکل‌گیری ناپایداری‌های جوی توأم با تندر بسیار محدود است.





شکل ۳- (a) میانگین، (b) ضریب تغییرات سالانه فراوانی رعدوبرق و (c) مرکز میانگین و بیضی استاندارد
Fig.3. a) Mean, f) annual coefficient of variation of lightning frequency, and c) mean center and standard ellipse

شکل ۳ (b) توزیع مکانی ضریب تغییرات فراوانی رعدوبرق، به‌عنوان نمایه‌ای از میزان پایداری در دفعات رخداد، را نشان می‌دهد. متوسط ضریب تغییرات ایستگاه‌ها حدود ۲۵/۵ درصد حاصل شد. مقدار ضریب تغییرات کم‌تر از ۲۵/۵ نشانه رخداد با ثبات‌تر حول میانگین است. هرچه این مقدار بیش از ۲۵/۵ درصد باشد، دال بر بی‌نظمی سال به سال وقوع رعدوبرق و گویای تفاوت‌های شدید سالانه آن است. همچنین بر اساس شکل مربوط می‌توان دریافت که ضریب تغییرات داده‌های رعدوبرق در اکثر نقاط کشور با بی‌نظمی مشخص می‌شود. این نامنظمی را می‌توان به تغییرات عواملی نظیر شرایط اقلیمی و نقش عوامل جغرافیایی نسبت داد. بنابر نظر علیجانی (Alijani, 1995) تنوع اقلیمی ایران با تفاوت‌های چشمگیر دما، رطوبت، و بارش به وضوح مشهود است؛ به‌عنوان مثال مناطق کوهستانی با بارش فراوان و دمای پایین، مناطق جنوبی با دماهای بالا و بارش کم، و مناطق شمالی با تنوع دمایی و بارش سالانه و چشمگیر، هر یک جلوه‌هایی از این تنوع هستند. همچنین وجود مراکز فشار متنوع و در نتیجه ظهور جبهه‌های هوایی، تنوع اقلیمی را در پی دارد. این تنوع در اقلیم ایران تظاهرات مختلفی دارد. یکی از این تظاهرات تنوع در عناصر، پدیده‌ها و مخاطرات اقلیمی است. در این زمره تنوع در پدیده رعدوبرق را می‌توان یاد نمود.

مرکز میانگین و بیضی استاندارد در شکل ۳ (c) ارائه شده است. همانطور که در نقشه مشخص است، محل قرارگیری مرکز میانگین به صورت دایره قرمز رنگ در مختصات ۳۲ درجه عرض شمالی و ۵۲ درجه طول شرقی مشاهده می‌شود. این نقطه به‌عنوان مرکز ثقل رعدوبرق در ایران است. این نقطه در واقع میانگین فضایی رخداد رعدوبرق را نشان می‌دهد و مشابه میانگین در آمار کلاسیک است. از این نقطه به سمت شمال و غرب کشور متوسط فراوانی رعدوبرق افزایش و به سمت شرق و جنوب کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، دفعات رخداد رعدوبرق ناحیه کم وسعت شمال - غرب برابر با فراوانی گستره فراخ جنوب و شرق این نقطه است. شایسته است که به این نکته اشاره شود که این نقطه ثابت نبوده و در طول دوره آماری جا به جا می‌شده است. پهنه‌ای که مرکز میانگین، به طور متوسط در آن جا به جا می‌شد، به وسیله بیضی استاندارد نشان داده شده است. بیضی استاندارد ارائه شده، به طور ساده جهت‌گیری جنوب‌شرقی - شمال‌غربی مرکز میانگین را نشان می‌دهد.

تحلیل احتمالاتی

تحلیل‌های این بخش براساس اصول احتمالات، و برازش توزیع احتمال دوجمله‌ای بر روی داده‌های رعدوبرق در ایران ارائه می‌شود. این تحلیل شامل ارزیابی فراوانی وقوع رعدوبرق در مناطق مختلف ایران و با استناد به نتایج به دست آمده، الگوهای مختلف وقوع این پدیده‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج این تحلیل در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ ارائه شده است:

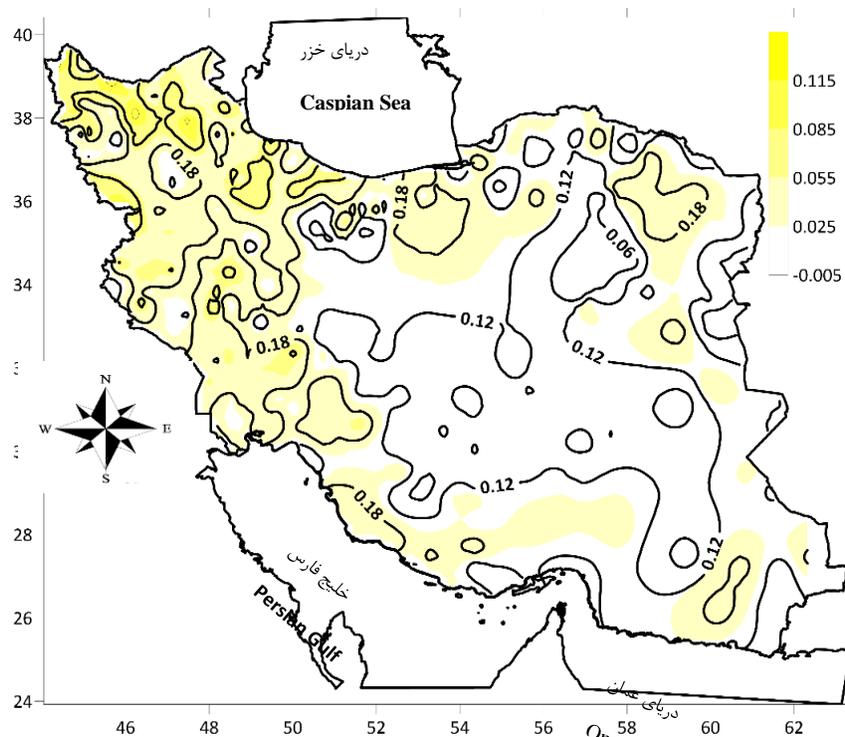
شکل ۴ توزیع مکانی احتمال وقوع رعدوبرق (پس‌زمینه رنگی) و انحراف معیار داده‌ها (خطوط هم‌مقدار) را طی بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۰۰ نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار احتمال وقوع منطبق بر نواحی مرتفع و کوهستانی سلسله جبال زاگرس و البرز می‌باشد. از جمله دلایل بیشترین احتمال رخداد در این منطقه می‌توان، به عاملی از قبیل کوهستانی بودن منطقه، که محل عبور توده‌های متعدد آب و هوا و نابرابری در توزیع تابش انرژی خورشیدی بر دامنه‌های آفتاب‌گیر بوده که خود منجر به شکل‌گیری ناپایداری و صعود هوای گرم و مرطوب ناشی از همرفت دامنه‌ای در برخی از ایام سال است. نیمه غربی ایران و به ویژه ناحیه شمال‌غرب ایران، در دوره سرد سال محل عبور توده‌های هوای متعددی از جمله بادهای غربی، چرخندهای مدیترانه‌ای و امواج کوتاه همراه آنها به درون کشور می‌باشد که شرایط را برای ایجاد ناپایداری و وقوع پدیده رعدوبرق فراهم می‌کند. بدین ترتیب طبق نظر علیجانی (Alijani, 1995) همه عوامل یاد شده در ایجاد رعدوبرق در این نواحی مؤثر هستند. پس از این ناحیه، ناحیه شمالی ایران نیز به دلیل دسترسی به رطوبت دریای خزر و ارتفاعات قابل ملاحظه و تأثیرپذیری این ناحیه از توده‌های آب و هوای متعددی از جمله توده‌های مهاجر غربی از یک سو و پرفشار سبیری از سوی دیگر، شرایط را برای ایجاد رخداد پدیده رعدوبرق فراهم می‌آورد. یافته‌های عساکره و همکاران (Asakereh, Khosravi, Doostkamian & Solgimoghaddam, 2020) این موضوع را تأیید کرده است.

علاوه بر نواحی جغرافیایی مذکور، نواحی پراکنده دیگری از جمله شمال شرق و جنوب ایران از در اولویت‌های احتمالاتی بعدی قرار می‌گیرند. در ناحیه شمال شرقی ایران وجود کوه‌های نسبتاً مرتفعی از جمله کپه داغ و هزار مسجد شرایط را برای صعود اجباری توده‌های عبوری از این منطقه، شرایط وقوع رعدوبرق را فراهم می‌آورد. در نواحی شرقی ایران گره‌های کوهستانی پراکنده‌ای اشاره نمود که به دلیل قرارگیری مسیر توده‌های غرب و ایجاد ناپایداری در مقیاس محلی فراهم نموده و منجر به افزایش میزان وقوع پدیده مذکور در این نواحی می‌شود. نتایج این بخش در پژوهش عساکره و همکاران (Asakereh et al., 2020) ذکر شده است. در نواحی جنوبی ایران به دلیل همجواری با پهنه‌های وسیع رطوبتی (از جمله خلیج فارس و دریای عمان) از یک سو و تأثیرپذیری از شرایط آب و هوای متعددی از جمله جریانات غربی و جریانات جنوبی و جنوب‌شرقی (نظیر سامانه‌های موسمی) در هنگام برخورد با ارتفاعات پراکنده این نواحی، منجر به مهیایی شرایط برای رخداد پدیده رعدوبرق می‌شود. بعد از ارتفاعات شمال‌غرب، ارتفاعات جنوب‌شرقی به خصوص منطقه سراوان از بیشترین میزان احتمال وقوع پدیده رعدوبرق برخوردار است. براساس این نقشه فراوانی

احتمال پدیده رعدوبرق با نتایج تحقیقات دکتر علیجانی (Alijani, 2004) منطبق است همان‌طور که ایشان اشاره کردند، بیشینه رعدوبرق ایران در شمال غرب و جنوب شرق رخ می‌دهد.

در مناطق مرکزی ایران به دلیل فقدان ارتفاع قابل ملاحظه در مسیر توده‌های مهاجر غربی و شمالی از یک سو و از سوی دیگر به دلیل این‌که توده‌های هوایی مهاجر بخش اعظم رطوبت خود را در طی مسیر رسیدن به این ناحیه از دست می‌دهند، احتمال وقوع پدیده رعدوبرق به خوبی مهیا نبوده و به همین دلیل این ناحیه هم به لحاظ فراوانی وقوع و هم احتمال وقوع پدیده رعدوبرق به کم‌ترین مقدار ممکن می‌رسد. قائدی (Ghaedi, 2021) در پژوهش خود این نتیجه را تأیید کرده است.

توزیع مکانی انحراف معیار احتمال رخداد رعدوبرق نشان می‌دهد مناطقی که از بیشترین انحراف معیار برخوردار است، منطبق بر نواحی توأم با بیشترین احتمال وقوع است. از این قبیل می‌توان به نواحی شرقی کشور اشاره نمود. این امر بر این واقعیت دلالت دارد که واداشتهای رعدوبرق در این نواحی، واداشتهای ثابت یا منظمی نیستند. از این رو قطعیت احتمالات ارائه شده همچون میزان احتمالات کم است. به عبارت دیگر، تغییرات اندک در واداشتهای مورد بحث، نتایج احتمالات را به طور قابل توجهی تغییر می‌دهند. در نواحی نظیر ایران مرکزی که مقدار انحراف معیار پایین است، گواهی بر ثبات در کمبود پدیده رعدوبرق و ثبات نسبی در تمام ایام سال دارد. بنابراین حاکمیت این شرایط باعث می‌گردد که مقدار انحراف معیار پدیده رعدوبرق در این ناحیه کم باشد.



شکل ۴- احتمال وقوع رعدوبرق (پس‌زمینه رنگی) و انحراف معیار داده‌ها (خطوط هم‌مقدار)

Fig.4. Lightning occurrence probability (colored background) and data standard deviation (Contour lines)

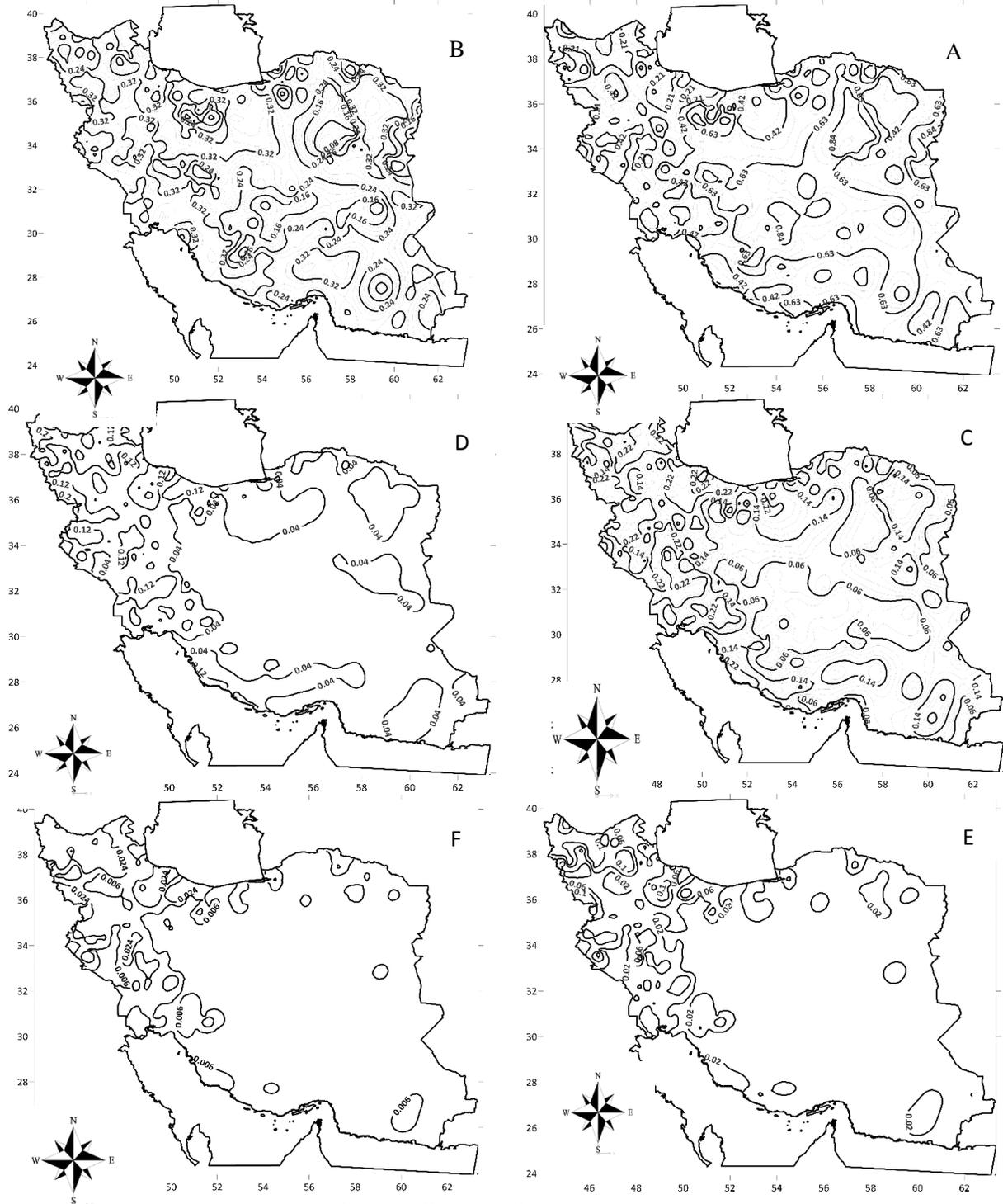
نقشه‌های اشکال شماره ۵ A تا F احتمال تداوم روزهای بدون رعدوبرق و روزهای توأم با ۱ روز تا ۵ روز رعدوبرق در طی ۳۰ روز متوالی (یک ماه) را نشان می‌دهد، به‌عنوان مثال همان‌طور که در شکل شماره ۴ (A) مربوط به احتمال ۳۰ روز متوالی بدون رخداد پدیده رعدوبرق مشاهده می‌شود، در نواحی بیابانی احتمال عدم وقوع رعدوبرق در ۳۰ روز متوالی بسیار بالا و حدود ۸۴ درصد است. در نواحی مرکزی این احتمال تا ۶۳ درصد و نواحی جنوبی و جنوب‌غربی نیز تا حدود ۴۲ درصد کاهش می‌یابد. نواحی شمال غربی

و ساحلی دریای خزر این احتمال تا حدود ۲۱ درصد مشخص می‌شود. با افزایش تعداد روزهای توأم با رعدوبرق در طی ۳۰ روز، اگرچه احتمال رخداد کاهش می‌یابد، اما الگوی فضایی تغییر قابل توجهی نشان نمی‌دهد. به عبارت دیگر، مطابق شکل ۵ (B)، احتمال وقوع دست کم یک رعدوبرق در یک ماه، در نواحی شمال غرب، شمال و شمال شرقی کشور، به دلیل شرایط آب و هوایی مناسبی که شامل ظهور و گذر سامانه‌های ناپایداری جوی فراوان و تشکیل ابرهای کولونیموس، بیشینه (حدوداً ۳۲ درصد) است. در نواحی مرکزی و جنوب شرقی کشور، احتمال وقوع حداقل یک رعدوبرق در سی روز حدوداً ۲۴ درصد است. در نواحی بیابانی کشور، کمترین میزان احتمال وقوع یک رعدوبرق در ماه (حدوداً ۱۶ درصد) است.

مطابق شکل ۵ (C)، احتمال وقوع دو روز توأم با رعدوبرق در ۳۰ روز متوالی در نواحی ارتفاعات البرز و زاگرس بیشینه (حدوداً ۲۴ درصد) است. در نواحی مرکزی، جنوبی، جنوب شرقی و شمال شرقی کشور، احتمال وقوع رعدوبرق، حدوداً ۱۴ درصد است که کم‌تر از مناطق مرتفع است. در نواحی بیابانی کشور، کم‌ترین احتمال وقوع دو روز توأم رعدوبرق در طی یک ماه تا حدوداً ۶ درصد برآورد شد. مطابق شکل ۵ (D)، احتمال وقوع ۵ روز توأم با رعدوبرق در ۳۰ روز متوالی، با درصد بسیار پایین نزدیک به ۰/۰۱ در نواحی زاگرس مرتفع و غرب دریای خزر بیشینه مقادیر احتمالاتی قابل مشاهده است و در دیگر مناطق کشور احتمال بسیار نزدیک به صفر است.

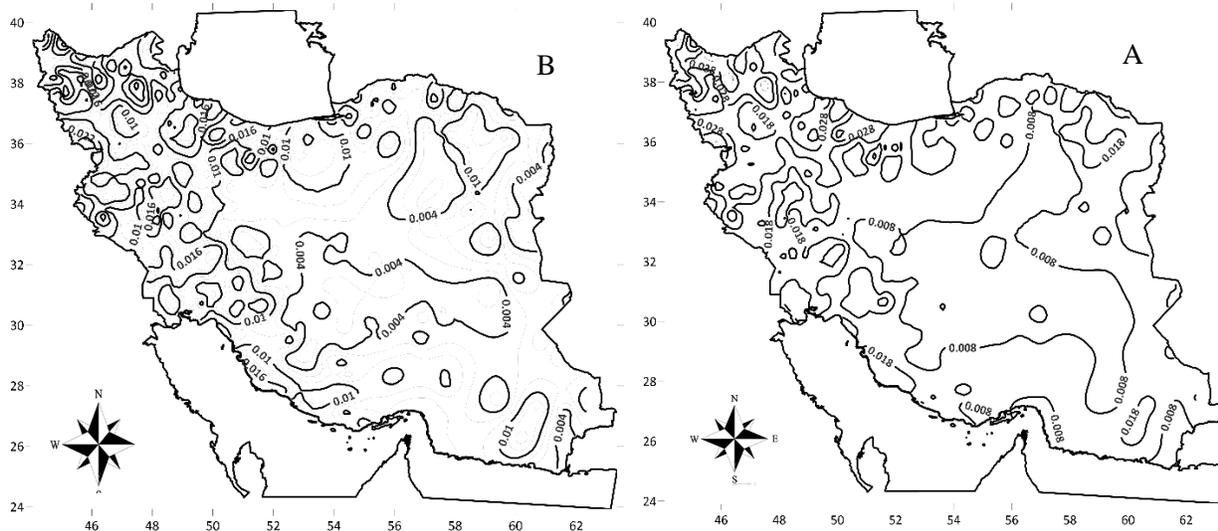
شکل ۶ (A) و (B) به ترتیب شبیه‌سازی داده‌های احتمال وقوع رعدوبرق برای ۲۳ سال آینده (۲۰۲۳-۲۰۴۶) و ۴۶ سال آینده (۲۰۲۷-۲۰۶۹) به شرط ثابت بودن احتمال وقوع‌های کنونی را نشان می‌دهند. براساس شکل ۶ (A) (توزیع مکانی احتمال به شبیه سازی ۲۳ سال آینده)، احتمال وقوع رعدوبرق برای مناطق شمال غرب و نوار غربی سواحل دریای خزر ۰/۰۲۸ است. بنابراین پیش‌بینی می‌شود که در آینده، بیشترین احتمال وقوع پدیده رعدوبرق در این ناحیه باشد. احتمال وقوع حاصل از شبیه سازی مربوط به نواحی جنوبی و شمال شرق و جنوب شرقی ۰/۰۱۸ می‌باشد. در نواحی ایران مرکزی، منطبق بر بیابان‌های داخلی نیز احتمال وقوع رعدوبرق به ۰/۰۰۸ می‌رسد.

در شکل ۶ (B)، شبیه‌سازی داده‌های احتمال وقوع رعدوبرق برای دو برابر دوره آماری (۲۰۴۷-۲۰۶۹) نشان می‌دهد، در آینده نواحی زاگرس و شمال غرب، ۰/۰۲۲ احتمال وقوع رعدوبرق وجود دارد. در نواحی شمالی و جنوب غربی ۰/۰۱۶ و در نواحی ایران مرکزی نیمه شرقی کشور حدوداً ۰/۰۰۴ احتمال رخداد رعدوبرق مورد انتظار است.



شکل ۵- (A) احتمال عدم وقوع رعدوبرق و احتمال وقوع دست کم (B) یک روز (C) دو روز (D) سه روز (E) چهار روز و (F) پنج روز متوالی رعدوبرق در ۳۰ روز

Fig.5. A) Probability of no lightning and probability of at least B) one day, C) two days, D) three days, E) four days, and F) five consecutive days of lightning in 30 days.



شکل ۶- شبیه‌سازی داده‌های رعدوبرق برای طول دوره‌های آینده

Fig.6. Lightning data simulation for future periods

تحلیل و الگوسازی روابط

جدول ۳ ضریب همبستگی بین مختصات مکانی - ارتفاع با میانگین و ضریب تغییرات سالانه فراوانی رعدوبرق در گستره ایران زمین را نشان می‌دهد. براساس این جدول اگرچه تمامی روابط خطی بین متغیرهای مورد بررسی به لحاظ آماری معنی‌دار است، اما میزان همبستگی خطی بسیار کم است. به‌عنوان مثال بیشترین رابطه (معکوس) بین میانگین سالانه فراوانی رخدادهای رعدوبرق و طول جغرافیایی حدود $0/328-$ بود. یعنی با افزایش طول جغرافیایی میانگین سالانه داده‌های رعدوبرق کاهش می‌یابد بر این اساس و براساس ضریب تعیین تنها حدود ۱۱ درصد تغییرات سالانه فراوانی رعدوبرق به وسیله طول جغرافیایی توجیه می‌شود. بنابراین نظر علیجانی و هرمان (Alijani & Harman, 1985) اقلیم ایران، به‌ویژه نیمه غربی آن به دلیل واقع شدن در نزدیکی جبال زاگرس و کوهستان‌های البرز و نیز مجاورت با بیابان‌های همجوار، نظیر صحرای عربستان، و ایران مرکزی به طور معمول تحت تأثیر توده هوای گوناگون است، به طوری که این ناحیه محل برخورد توده‌های گرم و خشک با توده‌های هوای سرد است. بنابراین، با توجه به تأثیر توده‌های هوایی مختلف و جبهه‌های هوا، اقلیم نیمه غربی ایران دارای شرایط هواشناسی متنوع و پویا است که ممکن است منجر به وقوع پدیده‌های هواشناسی گوناگون، نظیر رعدوبرق، گردد. اما در نیمه شرقی کشور این شرایط کاهش می‌یابد؛ در نتیجه شرایط برای ایجاد رعدوبرق به سختی فراهم می‌شود. رابطه ضریب تغییرات میانگین سالانه رعدوبرق ایران و طول جغرافیایی نیز مثبت اما بسیار ضعیف و فاقد معنی آماری است. این ارتباط ضعیف بر تصادفی بودن ضریب تغییرات فراوانی رعدوبرق دلالت دارد. از این رو، این رابطه نمی‌تواند به صورت قاطع برای پیش‌بینی یا توصیف تغییرات در وقوع رعدوبرق مورد استناد قرار گیرد.

ضریب همبستگی مثبت بین میانگین سالانه رعدوبرق ایران و عرض جغرافیایی نشان‌دهنده وجود یک رابطه مثبت بین این دو متغیر است. بدین مفهوم که با افزایش عرض جغرافیایی میانگین سالانه رعدوبرق افزایش پیدا می‌کند. بنابراین نظر عساکره و رزمی قلندری (Asakere & Razmi Qalandari, 2014)، الگوهای بارشی در منطقه شمال غرب ایران (عرض‌های جغرافیایی بالا) نشان می‌دهد که در این منطقه، رژیم بارش به صورت یکنواخت‌تر و پایدارتر است. این مناطق دارای کم‌ترین ضریب تغییرات و بیشترین یکنواختی بارش هستند، که نشان از وجود الگوهای بارشی یکنواخت و پایدار در این مناطق دارند. این ویژگی‌ها می‌توانند نشان‌گر فعالیت مستمر و پایدار سامانه‌های باران‌زا در این نواحی باشد. همچنین بنابر نظر علیجانی و هرمان (Alijani & Harman, 1985)

مناطق غرب و شمال غرب به جهت نزدیکی به منابع رطوبتی و گذر فراوان بادهای غربی در این منطقه از همگنی مناسبی برخوردار هستند. رابطه ضریب تغییرات میانگین سالانه رعدوبرق ایران با عرض جغرافیایی با مقدار معکوس و بسیار کم ($-0/2$) مشخص می‌شود. براساس علامت این همبستگی، با افزایش عرض جغرافیایی، ضریب تغییرات سالانه رعدوبرق ایران کاهش می‌یابد. بنابر نظر اسماعیلی محمودآبادی و صادقی (Esmaeili Mahmoudabadi & Sadeghi, 2023)، این رابطه به دلیل تغییر الگوهای باد و توپوگرافی است. با افزایش عرض جغرافیایی، پایداری در الگوهای بارش افزایش یافته و بر رویدادهای هیدروالکتریک از جمله پدیده رعدوبرق تأثیر می‌گذارد.

از سوی دیگر ضریب همبستگی بین میانگین سالانه رعدوبرق ایران و ارتفاع نشان دهنده یک ارتباط بسیار ضعیف بین این دو متغیر است. بدین صورت که افزایش ارتفاع تأثیر بسیار کمی بر روی تغییرات میانگین سالانه رعدوبرق دارد و نمی‌توان به طور قطعی از وجود رابطه قوی بین آن‌ها سخن گفت. به عبارت دیگر، این ضریب همبستگی نشان می‌دهد که هرچند ممکن است یک ارتباط ملموس بین این دو متغیر وجود داشته باشد، اما این ارتباط در قالب ارتباط خطی از قطعیت بالایی برخوردار نیست. بنابر نظر عساکره و همکاران (Asakereh et al., 2020)، عوامل بیرونی به طور قابل توجهی بر بارش‌های ایران و به ویژه نواحی شمال غربی کشور تأثیر دارند، در حالی که نواحی حاشیه‌ای از جمله کوه‌های زاگرس، سواحل خزر، و مرزهای شرقی ایران، بیشتر از عوامل درونی تأثیر می‌پذیرند. بنابر نظر رسولی و همکاران (Rasouli et al., 2018)، با بررسی رابطه فراوانی رعدوبرق‌ها با ارتفاع نشان دادند که بیشینه فراوانی رعدوبرق‌ها در دامنه‌های جنوبی و قبل از رسیدن به قله اصلی و در ارتفاع بین ۷۰۰ تا ۱۲۰۰ متر رخ خواهند داد. بنابراین اگرچه ارتفاعات نقش مهمی در توزیع مکانی بارش ایفا می‌کنند؛ اما از آن‌جا که ارتفاعات در نواحی غربی و شمالی کشور متمرکز شده‌اند، مطالعه آنها در مقیاس ملی این نقش را نهان می‌سازد. از این‌رو تمرکز این تأثیرات متناسب با تمرکز ارتفاعات (شکل ۳ - a) است. با توجه به همبستگی بسیار ضعیف میان ضریب تغییرات میانگین سالانه رعدوبرق ایران با ارتفاع که ($0/04$)، می‌توان نتیجه گرفت که ضریب تغییرات میانگین سالانه رعدوبرق ایران با افزایش ارتفاع ایران تغییر چندانی پیدا نمی‌کند.

جدول ۳- ماتریس همبستگی خطی مشخصات سالانه رعدوبرق میانگین و ضریب تغییرات) با مختصات جغرافیایی - ارتفاع

Table 3- Linear correlation matrix of annual lightning characteristics (mean and coefficient of variation) with geographic coordinates - altitude

متغیرها Variables	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	ارتفاع Height	میانگین فراوانی Average frequency	ضریب تغییرات فراوانی Frequency coefficient of variation
طول جغرافیایی Longitude	1				
عرض جغرافیایی Latitude	-0.4010	1			
ارتفاع Height	-0.1229	0.1747	1		
میانگین داده‌ها Average data	-0.3280	0.2212	0.0520	1	
ضریب تغییرات Coefficient of variation	0.0931	-0.2011	0.0437	0.1993	1

به منظور واری و وجود رابطه غیرخطی بین متغیرها، متغیرهای مورد اشاره در جدول ۳ برای تمام حالات ممکن و به وسیله تبدیل شبه نرمال باکس - کاکس اعمال شد. بالاترین میزان همبستگی به ازای مقادیر λ مختلف استخراج شد. نتایج این بررسی در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول میزان λ برای هر دو متغیر، که در آن بالاترین همبستگی حاصل گردید، ارائه گردیده است. همان گونه که مشاهده می شود، بهترین برآورد ضریب همبستگی میانگین سالانه رعدوبرق با طول جغرافیایی که در روش خطی ۰/۳۲- بوده است در روش غیرخطی به ۰/۴۵- ارتقاء یافت. اما در بقیه موارد میزان همبستگی تغییرات چندانی نیافت. به عنوان مثال برای عرض جغرافیایی این عدد در روش خطی ۰/۲۲ و در روش غیرخطی ۰/۳۲ و میانگین سالانه با متغیر ارتفاع در روش خطی ۰/۰۵ و در روش غیر خطی ۰/۰۶ حاصل آمد. برای ضریب تغییرات داده ها با طول جغرافیایی نیز در روش خطی ۰/۰۹ و در روش غیر خطی ۰/۱۰، با عرض جغرافیایی در روش خطی ۰/۲۰- و در روش غیر خطی ۰/۱۹- و برای ارتفاع در روش خطی ۰/۰۴ و در روش غیرخطی ۰/۰۶ برآورد شد.

جدول ۴- بالاترین متوسط همبستگی عوامل جغرافیایی و میانگین فراوانی سالانه رعدوبرق و ضریب تغییرات آن

Table 4- Highest average correlation between geographical factors and average annual lightning frequency and its coefficient of variation

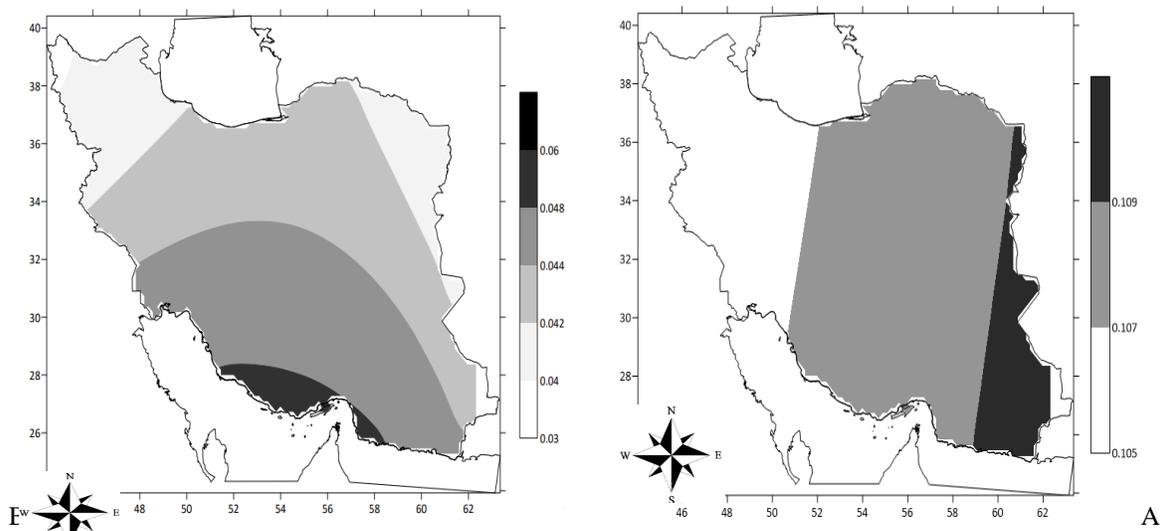
	طول جغرافیایی Longitude		عرض جغرافیایی Latitude		ارتفاع Height	
	λ	λ	ضریب همبستگی Correlation coefficient	ضریب همبستگی Correlation coefficient	λ	ضریب همبستگی Correlation coefficient
میانگین فراوانی	0.2	3	-0.45			
رخداد رعدوبرق	0.2			3	0/32	
Average frequency of lightning occurrence	1/8				1/6	0.06
ضریب تغییرات Coefficient of variation	0.8	3	0/1			
	0.7			-3	-0.19	
	0.1				2/2	0.60

با عنایت به آن چه که گفته شد و با توجه به ضریب همبستگی کم، نمی توان رابطه ای قطعی و تأثیرگذار بین این متغیرها استنباط نمود. این عدم قطعیت، را می توان به عوامل مختلفی نسبت داد. به عنوان مثال فقدان تراکم ایستگاهی در طیف های ارتفاعی مختلف در این زمره است؛ در مناطق شمال غربی کشور، تعداد ایستگاه سینوپتیک از تمرکز بالای برخوردار می باشند در حالی که در مناطق مرکزی و شرقی تعداد آن ها به شدت کاهش می یابد. حال آن که علاوه بر مختصات جغرافیایی - ارتفاع، عواملی احتمالی متعددی نظیر موقعیت جغرافیایی ارتفاعات، جهت گیری ارتفاعات، قرارگیری آن ها در مسیر توده هواهای عبوری و نیز میزان برخورداری از رطوبت و نیز میزان دما بر فراوانی پدیده رعدوبرق اثرگذار است. این توزیع نامتوازن امکان پایش دقیق را محدود می سازد. علاوه بر این، وجود خلاءهای آماری در داده های ایستگاه های همدید و نیز بی نظمی در رخداد رعدوبرق را می توان از محدودیت های قابل تأمل برشمرد. برای بررسی اثر توأم مختصات جغرافیایی - ارتفاع بر میانگین فراوانی سالانه رعدوبرق و نیز ارائه دیداری از الگوی فضایی این رابطه، از رگرسیون جغرافیایی موزون استفاده شد. در این زمینه دو نقشه تهیه شد. در نقشه اول (شکل ۷ A) توزیع مکانی ضریب

تعیین دو متغیر طول جغرافیایی - ارتفاع با متوسط فراوانی رخداد رعدوبرق و در نقشه دوم (شکل ۷ B) توزیع مکانی ضریب تعیین دو متغیر عرض جغرافیایی - ارتفاع با متوسط سالانه رخداد رعدوبرق ارائه شد.

همان گونه که در شکل ۷ (A) مشخص است، آستانه همبستگی از ۰/۱ تا ۰/۱۱ متغیر است. این مقادیر فاقد معنی آماری هستند. با این وجود، میزان ضریب تعیین از غرب به سمت شرق به طور نسبی افزایش می‌یابد، به طوری که بیشترین میزان ضریب تعیین در شرق و جنوب شرق کشور (مناطق مرتفع سراوان و کوه‌های مکران) دیده می‌شود. به نظر می‌رسد ارتفاعات موجود در شرق کشور به دلیل هم‌جواری با منابع رطوبتی جنوب ایران و تعامل توده‌های موسمی با ارتفاعات، شرایط نسبتاً مناسبی برای رخداد پدیده رعدوبرق در این نواحی فراهم می‌آورد. بنابر نظر علیجانی و هرمان (Alijani & Harman, 1985)، و رضایی و همکاران (Rezaei, Ahmadi & Mohamadi, 2019) در مطالعات خود نشان دادند که، شرق و جنوب‌شرقی ایران به دلیل توده‌های هوایی گرم و مرطوب از سمت جنوب و جنوب‌شرق، سامانه‌های همرفتی محلی ناشی از تابش شدید خورشید و جبهه‌های هوایی سرد از سمت شمال و شمال‌غرب می‌توانند شرایط را برای ایجاد ناپایداری هوا و بارش‌های رگباری یا رعدوبرق در این مناطق مهیا سازند. ارتفاعات موجود در این مناطق باعث ایجاد سامانه‌های همرفتی محلی می‌شوند که در اثر تابش شدید خورشید در طول روز شکل می‌گیرند. همچنین این سامانه‌های همرفتی محلی می‌توانند باعث ابرناکی و ناپایداری‌های توام با بارش‌های رگباری در برخی ساعات روز شوند.

در شکل ۷ (B) توزیع مکانی ضریب تعیین عرض جغرافیایی - ارتفاع با پدیده رعدوبرق طی دوره آماری ۲۳ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۲) را نشان می‌دهد، همان طوری که می‌توان دید حداکثر مقدار ضریب تعیین ۰/۰۶ است. همین مقدار ضریب تعیین که به لحاظ آماری معنی دار نیست در جنوب بیشتر و به سمت عرض‌های شمالی کاهش می‌یابد. این ویژگی را می‌توان به برخورد رطوبت ناشی از آب‌های گرم سواحل جنوبی به ارتفاعات در عرض‌های شمال‌یتر و تکوین شرایط برای همرفت‌های ناگهانی و رخداد رعدوبرق نسبت داد. بنابر نظر رضایی و همکاران (Rezaei et al., 2019)، توده‌های هوای مرطوب که از دریای عرب و خلیج فارس به جنوب ایران وارد می‌شوند، نقش مهمی در افزایش رطوبت نسبی و بارش‌های موسمی در فصول انتقالی بهار و پاییز ایفا می‌کنند. همچنین، تداخل و برخورد توده‌های سرد و گرم، شرایط آب و هوایی متغیر و ناپایدار را در جنوب ایران ایجاد می‌کند و منجر به بروز پدیده‌های جوی ناگهانی و شدید از جمله، رگبارهای شدید و طوفان‌های محلی می‌شود. این تغییرات سریع در شرایط آب و هوایی، نوسانات شدید دمایی و رطوبتی را در این مناطق به دنبال دارد.



شکل ۷- ضریب تعیین حاصل از مدل رگرسیون موزون برانزده بر (A) طول جغرافیایی و ارتفاع و (B) عرض جغرافیایی و ارتفاع

Fig.7. Coefficient of determination resulting from the weighted regression model fitted to A: (longitude and altitude) and B: (latitude and altitude)

نتیجه‌گیری

پدیده‌ی رعدوبرق یکی از پدیده‌های طبیعی است که در سطح جهان، به ویژه در مناطق با اقلیم متغیر، مانند ایران، رخ می‌دهد. با بررسی ویژگی‌های عمومی این پدیده در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۲ در محدوده ایران زمین با استفاده از روش‌های آماری مشخص شد. مختصات جغرافیایی و ارتفاع در پراکندگی و فراوانی رعدوبرق تأثیر خطی قابل توجهی بر جای نمی‌گذارند. همچنین با بررسی نقشه ضریب تغییرات داده‌های رعدوبرق، نتایج دال بر بی‌نظمی وقوع پدیده‌ی رعد و برق و گویای تفاوت‌های شدید سالانه این پدیده در ایران است. بررسی همبستگی بین مختصات جغرافیایی - ارتفاع و فعالیت رعدوبرق در ایران نشان می‌دهد که ارتباطات معنی داری خطی کم است. با این وجود عرض جغرافیایی با میانگین فعالیت رعدوبرق رابطه ضعیفی دارد، اما همین رابطه کم در عرض‌های شمالی‌تر، افزایش می‌یابد. همچنین، طول جغرافیایی با میانگین رعدوبرق رابطه منفی و متوسطی دارد، به طوری که با افزایش طول (به سمت شرق کشور)، میانگین سالانه رعدوبرق کاهش پیدا می‌کند.

بررسی توزیع احتمال دوجمله‌ای بر داده‌های رعدوبرق در ایران نتایج نشان می‌دهد، که مناطق مختلف ایران، احتمال وقوع رعدوبرق متفاوتی دارند که با عواملی همچون جغرافیا و شرایط آب و هوایی مرتبط است. مناطقی مانند شمال غرب و جنوب شرق ایران بیشترین میزان وقوع را دارند، در حالی که مناطق دیگر در اولویت‌های بعدی قرار می‌گیرند.

به نظر می‌رسد که پدیده رعدوبرق در گستره ایران زمین یک پدیده تصادفی بوده و به لحاظ فضایی ارتباط خطی معنی‌داری با مختصات جغرافیایی - ارتفاع نشان نمی‌دهند. بنابراین، اگرچه مختصات جغرافیایی و ارتفاع در مقیاس محلی می‌توانند بر پدیده رعدوبرق اثرگذار باشند، اما تأثیر آنها به طور خطی و ساده قابل مشاهده نیست. از این رو با تغییر طول و عرض جغرافیایی و همچنین ارتفاع، تأثیر قطعی بر فراوانی و شدت رخداد رعدوبرق مشاهده نمی‌شود. عوامل دیگری مانند شرایط جوی، پوشش ابری و زمینه‌های محلی می‌توانند نقش مؤثرتری در بروز این پدیده داشته باشند.

مطالعات پرشماری از جمله رسولی و همکاران (Rasuli et al., 2018)، علیجانی (Alijani, 1995)، عساکره و رزمی (Asakereh & Razmi Qalandari, 2014)، عساکره و همکاران (Asakereh et al., 2020)، قائدی (Ghaedi, 2021)، صادقی (Esmaeili & Mahmoudabadi & Sadeghi, 2023) این یافته‌ها را تأیید می‌کنند. امروزه پیش‌های مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای و توسعه مراکز پیش‌بینی و مدل‌سازی رویدادهای اقلیمی، امکان دسترسی به داده‌های تقریباً به هنگام و دقیق را فراهم کرده‌است. داده‌های ماهواره‌ای از جمله داده‌های سنجنده LIS ماهواره TRMM در کنار داده‌های ایستگاهی و یا بعضاً در مکان‌های فاقد داده مورد استفاده قرار می‌گیرد که در پژوهش‌های مختلف اعتبار این داده‌ها مورد بررسی و تأیید قرار گرفته‌است. بنابراین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی از داده‌های ماهواره‌ای استفاده گردد. زیرا داده‌های ماهواره‌ای به دلیل پوشش زمانی - مکانی مناسب، نقاط ضعف داده‌های ایستگاهی را پوشش داده و ضمن برآورد دقیق‌تری از توزیع زمانی و مکانی پدیده رعدوبرق، شناخت جامع‌تری از ویژگی‌های این پدیده، در اقلیم مختلف ایران ارائه خواهد داد.

References

- Adhikari, P. B. (2023). Different Measurement System of Lightning. *European Journal of Applied Physics*, 5(3), 26-30. <https://10.24018/ejphysics.2023.5.3.264>
- Alijani, B., & Harman, J. R. (1985). Synoptic climatology of precipitation in Iran. *Annals of the Association of American Geographers*, 75(3), 404-416. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1985.tb00075.x>
- Alijani, B. (1995). *Iranian Meteorology*. Tehran: Payam-Noor Publication. [In Persian]
- Alijani, B. (2004). *Iran's Climate*. Tehran: Payam-Noor University Publications. [In Persian]
- Alizadeh-Choobari, O., & Najafi, M. S. (2018). Extreme weather events in Iran under a changing climate. *Climate Dynamics*, 50(1), 249-260. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3602-4>
- Asakere, H., & Razmi Qalandari, R. (2014). Temporal distribution and precipitation regime in northwest Iran. *Geographical Research*, 29(1), 145-160. [In Persian] <http://georesearch.ir/article-1-421-en.html>
- Asakere, H., & Seifipour, Z. (2012). Spatial modeling of annual precipitation in Iran. *Geography and Development*, 10(29), 15-30. [In Persian] https://gdij.usb.ac.ir/article_117.html
- Asakereh, H. (2011). *Fundamentals of Statistical Climatology*. Zanjan: Zanjan University Press. [In Persian]
- Asakereh, H., Khosravi, Y., Doostkamian, M., & Solgimoghaddam, M. (2020). Assessment of spatial distribution and temporal trends of temperature in Iran. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 56(4), 549-561. <https://doi.org/10.1007/s13143-019-00150-9>
- Asakereh, H., Masoodian, S. A., & Tarkarani, F. (2021). Variation in the spatial factors affecting precipitation in relation to the decadal changes of annual precipitation in Iran. *Geography and Environmental Planning*, 32(3), 129-146. [In Persian] https://gep.ui.ac.ir/article_25816_en.html
- Asakereh, H., Tarkarani, F., & Soltani, S. (2014). Circulation Patterns of Heavy Rains in the North West of Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 1(1), 85-96. [In Persian] <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2316-fa.html>
- Esmaeili Mahmoudabadi, A., & Sadeghi, F. (2023). Spatial-statistical analysis of lightning events in Iran. <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-2786331/v1>
- Fattahi, E., & Hejazizadeh, Z. (2006). Temporal and spatial analysis of air masses and its application in monitoring dry and wet periods in southwestern basins of Iran. *Geographical Research*, 21(2), 99-119. [In Persian]
- Fischer, J., Groenemeijer, P., Holzer, A., Feldmann, M., Schröer, K., Battaglioli, F., ... & Antonescu, B. (2024). Invited perspectives: Thunderstorm Intensification from Mountains to Plains. *EGU Sphere*, 2024, 1-41. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2798>
- Gao, Z. Y., Chen, Q. X., Gao, P., Huang, C. L., Yuan, Y., & Tan, H. P. (2022). Global flash clustering and infrared radiance characteristics: Analysis of TRMM/LIS data. *Infrared Physics & Technology*, 123, 104202. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104202>
- Ghaedi, S. (2021). Anomalies of precipitation and drought in objectively derived climate regions of Iran. *Hungarian Geographical Bulletin*, 70(2), 163-174. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.70.2.5>
- Goodman, S. J., Blakeslee, R. J., Koshak, W. J., Mach, D., Bailey, J., Buechler, D., ... & Stano, G. (2013). The GOES-R geostationary lightning mapper (GLM). *Atmospheric Research*, 125, 34-49. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.01.006>
- Javan, K., & Azizzade, M. R. (2018). Spatial-Temporal Modeling of Thunderstorm Occurrence in the Northwest Iran. *Physical Geography Research*, 50(1), 87-100. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.229988.1007027>
- Kaplan, J. O., & Lau, K. H. K. (2021). The WGLC global gridded lightning climatology and time series. *Earth System Science Data*, 13(7), 3219-3237. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3219-2021>

- Kaplan, J. O., & Lau, K. H. K. (2022). World wide lightning location network (WWLLN) global lightning climatology (WGLC) and time series, 2022 update. *Earth System Science Data*, 14(12), 5665-5670. <https://doi.org/10.5194/essd-14-5665-2022>, 2022
- Kaviani, M. R., & Alijani, B. (2004). *Fundamentals of Meteorology*. Tehran: Samt Publications. [In Persian]
- Khorshiddoust, A. M., Rasouly, A. A., & Fakhari Vahed, M. (2017). Spatio-temporal Distribution of Lightning Phenomenon in Iran Using TRMM Lightning Image Sensor (LIS) Data. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 6(1), 89-107. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geo.v6i1.53347>
- Kilinc, M., & Beringer, J. (2007). The spatial and temporal distribution of lightning strikes and their relationship with vegetation type, elevation, and fire scars in the Northern Territory. *Journal of Climate*, 20(7), 1161-1173. <https://doi.org/10.1175/JCLI4039.1>
- Lashkari, H. (2011). *Principles and foundations of preparation and interpretation of climatic maps and diagrams*. Tehran: Shahid Beheshti University Publications. [In Persian]
- Lu, B., Charlton, M., Harris, P., & Fotheringham, A. S. (2014). Geographically weighted regression with a non-Euclidean distance metric: a case study using hedonic house price data. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(4), 660-681. <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.865739>
- Mofokeng, D. O., Adelabu, A. S., Adepoju, K., & Adam, E. (2019). Spatio-temporal analysis of lightning distribution in golden gate highlands national park (gghnp) using geospatial technology. Paper presented at the Proceedings of IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium In IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8897912>
- Moradi, H. R. (2004). The role of Caspian Sea in the precipitation of northern coasts of Iran. *Journal of Marine Technics and Sciences of Iran, second periods (2-3)*, 77-88. [In Persian]
- Price, C. (2009). *Thunderstorms, lightning and climate change*. In *Lightning: Principles, instruments and applications: Review of modern lightning research*. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9079-0_24
- Rafi, M. H., & Mostafa, M. G. (2022). Global lightning phenomena and time series model of lightning flash radiance. Paper presented at the Proceedings of the 2022 International Conference on Energy and Power Engineering (ICEPE). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEPE56629.2022.10044878>
- Rahman, M. S., Yang, R., & Di, L. (2018). Clustering Indian Ocean tropical cyclone tracks by the standard deviational ellipse. *Climate*, 6(2), 39. <https://doi.org/10.3390/cli6020039>
- Rasuli, A. A., Khorshiddoust, A. M., & Fakhari Vahed, M. (2018). Investigating the frequency distribution of lightning and its relation with elevation in Southeast of Iran. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 27(106), 169-178. [IN Persian] <https://doi.org/10.22131/sepehr.2018.32340>
- Shindo, T., Matsubara, H., Suda, T., & Miki, T. (2012). Development of a lightning risk assessment program (LIRAP). *IEEEJ Transactions on Power and Energy*, 132(8), 747-753. <https://dx.doi.org/10.1541/ieejpes.132.747>
- Taszarek, M., Allen, J., Púčík, T., Groenemeijer, P., Czernecki, B., Kolendowicz, L., ... & Schulz, W. (2019). A climatology of thunderstorms across Europe from a synthesis of multiple data sources. *Journal of Climate*, 32(6), 1813-1837. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0372.1>
- Thomson, E. M. (1980). The dependence of lightning return stroke characteristics on latitude. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 85(C2), 1050-1056. <https://doi.org/10.1029/JC085iC02p01050>
- Vahidi Asl, M. S. (2011). *Characteristics of Statistics and Probability in Geography*. Tehran: Payam-e-Noor University. [In Persian]
- Wong, D. W., & Wang, F. (2018). Spatial Analysis Methods. In *Comprehensive geographic information systems*. Oxford: Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09598-1>



Spatio-Temporal Analysis of Earthquake Occurrences in Iran (1996–2024): A Vulnerability Assessment with a Focus on Urban Areas

Roya Moghabeli ¹, Faezeh Bahadori ², Alireza Mohammadi ^{3*}

^{1&2}Ph.D. Student, Department of Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran

²Professor, Department of Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History

Received: 28 March 2025

Revised: 28 July 2025

Accepted: 29 July 2025

Available Online: 31 July 2025

Keywords:

Earthquake
Assessment

Hazard

Seismic Vulnerability

Spatial Analysis

GIS

Earthquake Clustering

Earthquakes are among the most destructive natural hazards worldwide, causing extensive damage to human societies each year. Spatial and temporal analysis of this phenomenon plays a key role in identifying high-risk areas and guiding crisis management strategies. Due to its location on the active Alpine-Himalayan seismic belt, Iran is one of the most earthquake-prone countries in the world, with over 1,150 fatal earthquakes recorded in the past century. This study aimed to identify the spatial and temporal patterns of earthquakes in Iran from 1996 to 2024 using data from more than 10,000 seismic events ($M \geq 4$), analyzed using GIS tools. Methods employed included Kernel Density Estimation, Getis-Ord G_i^* hot spot analysis, and Local Moran's I index. Results revealed that the highest concentrations and clustering of earthquakes were observed in the western and southwestern regions, especially along the Zagros and Alborz faults. Furthermore, 59% of Iranian cities lie within 14 km of earthquake epicenters, with cities such as Zarand, Khormuj, and Kazeroon facing very high seismic risk. The study's innovation lies in its nationwide scale and the integration of extensive datasets with advanced spatial models. The findings provide critical insights to support urban retrofitting, disaster risk reduction policies, and enhanced resilience in earthquake-prone areas.

* Corresponding author: Dr. Alireza Mohammadi

E-mail address: a.mohammadi@uma.ac.ir

How to cite this article: Moghabeli, R., Bahadori, F., & Mohammadi, A. R. (2025). Spatio-Temporal Analysis of Earthquake Occurrences in Iran (1996–2024): A Vulnerability Assessment with a Focus on Urban Areas. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 166-189. <https://doi.org/10.22067/geoech.2025.92804.1562>



©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

Earthquakes are among the most devastating natural disasters, causing significant human and financial losses worldwide. Iran, located in the seismically active Alpine-Himalayan belt, has experienced numerous destructive earthquakes due to its complex tectonic structure. The country's vulnerability to earthquakes is further exacerbated by rapid urbanization, poor building standards, and a high concentration of population in high-risk areas.

Since 1996, more than 10,000 earthquakes (magnitude ≥ 4.0) have been recorded in Iran, with a significant portion occurring in the Zagros, Alborz, and eastern regions. The spatial and temporal analysis of earthquakes is essential for understanding their patterns and developing effective risk reduction strategies. Despite extensive studies on earthquake hazards, comprehensive research integrating spatial and temporal trends at a national scale remains scarce. This study seeks to address this gap by analyzing the spatial distribution and temporal occurrence of earthquakes in Iran from 1996 to 2024.

The key objectives of this research include:

- Identifying high-risk seismic zones based on historical earthquake data.
- Analyzing the relationship between seismic events and active fault lines.
- Assessing the vulnerability of urban areas to earthquake hazards.
- Providing insights for earthquake risk mitigation and urban planning policies.

Using GIS-based spatial analysis methods, this study evaluates earthquake clusters, density patterns, and their correlation with urban centers and fault zones. The findings contribute to a better understanding of seismic hazards in Iran and offer valuable recommendations for improving disaster preparedness and resilience in urban areas.

Material and Methods

Earthquakes are among the most devastating natural disasters, causing significant human and financial losses. Iran, located in the Alpine-Himalayan belt, has experienced frequent seismic activity due to its complex tectonic structure. Since 1996, more than 10,000 earthquakes (magnitude ≥ 4.0) have been recorded, mostly in the Zagros, Alborz, and eastern regions. Rapid urbanization, poor building standards, and dense populations in high-risk areas exacerbate the vulnerability. This study analyzes the spatial and temporal distribution of earthquakes in Iran (1996–2024) to identify high-risk zones, assess urban vulnerability, and provide insights for risk mitigation. Using GIS-based methods, we evaluate earthquake clusters, density patterns, and their correlation with fault zones.

This research adopts a quantitative approach using spatial analysis techniques. Earthquake data (magnitude ≥ 4.0) were obtained from the Iranian Seismological Center and processed in ArcGIS. Fault line maps and urban population data were integrated into a GIS framework. Spatial methods such as Kernel Density Estimation (KDE) identified high-risk zones, Getis-Ord G_i^* detected seismic clusters, and Buffer Analysis assessed city proximity to faults. Moran's I measured clustering patterns. The results highlight seismic hazard variations and provide guidance for urban planning strategies to enhance disaster resilience.

Results and Discussion

The results indicate that seismic activity is highly concentrated in western, northwestern, and southwestern Iran, particularly along the Zagros and Alborz fault lines. Kernel Density Estimation (KDE) revealed that the highest earthquake densities occur in the provinces of Hormozgan, Kerman, Fars, and Bushehr. Getis-Ord G_i^* analysis identified significant seismic hot spots in these regions, confirming their high-risk status. Buffer Analysis showed that nearly 59% of major Iranian cities are within 40 km of an earthquake epicenter, with cities like Zarand, Khormuj, Ravar, and Kazeroun being particularly vulnerable. Additionally, 73% of recorded earthquakes occurred at depths of less than 15 km, increasing the likelihood of severe damage in urban areas.

The findings align with previous studies, which highlight the active seismicity of western and southern Iran due to major fault systems. However, some discrepancies were observed, such as the lower-than-expected earthquake density in northeastern Iran, possibly due to variations in data collection periods and methodologies. These results emphasize the urgent need for stricter construction regulations, seismic hazard zoning, and the integration of GIS-based monitoring systems to enhance disaster preparedness and resilience.

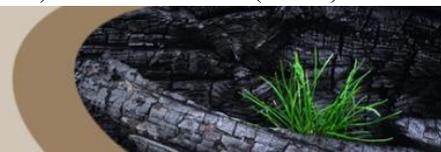
Future research should incorporate geotechnical factors, historical seismic patterns, and predictive modeling using artificial intelligence for improved risk assessment and mitigation strategies.

Conclusion

This study analyzed the spatial and temporal distribution of earthquakes in Iran from 1996 to 2024 (Gregorian calendar) to identify high-risk zones and assess urban vulnerability. The findings revealed that seismic activity is concentrated in western, northwestern, and southwestern regions, particularly along the Zagros and Alborz fault lines. Approximately 59% of major Iranian cities are within 40 km of an earthquake epicenter, increasing their risk of damage. Additionally, the majority of earthquakes occurred at shallow depths, further intensifying their impact on urban areas.

The results underscore the necessity for stricter construction regulations, enhanced seismic hazard zoning, and the integration of GIS-based monitoring systems to improve disaster preparedness. Implementing early warning systems, strengthening infrastructure, and promoting public awareness campaigns are crucial steps toward reducing earthquake risks.

Future research should focus on incorporating geotechnical assessments, historical seismic trends, and predictive modeling using artificial intelligence to enhance earthquake hazard mitigation strategies. By adopting a data-driven approach, policymakers and urban planners can develop more effective disaster risk management plans, ultimately increasing the resilience of Iranian cities against seismic hazards.



تحلیل فضایی - زمانی رخداد زلزله در ایران (۱۳۷۵-۱۴۰۳):

یک مطالعه آسیب شناسانه با نگاهی به شهرها

رؤیا مقابلی^۱،^{ID} فائزه بهادری^۲،^{ID} علیرضا محمدی^{۳*}

^۱ دانشجوی دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

^{۲*} استاد جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله:	زلزله یکی از مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی در جهان است که سالانه خسارات گسترده‌ای به جوامع انسانی وارد می‌کند. تحلیل فضایی و زمانی این پدیده می‌تواند نقش مؤثری در شناسایی نواحی پرخطر و مدیریت بحران ایفا کند. ایران به دلیل قرارگیری در کمربند فعال لرزه‌ای آلپ - هیمالیا، یکی از زلزله‌خیزترین کشورهای جهان است و طی یک قرن گذشته بیش از ۱۱۵۰ زلزله مرگبار در آن به ثبت رسیده است. پژوهش حاضر با هدف شناسایی الگوهای مکانی و زمانی زمین‌لرزه‌ها در ایران طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳، از داده‌های بیش از ۱۰,۰۰۰ زمین‌لرزه با بزرگای ۴ و بالاتر و ابزارهای GIS بهره گرفته است. ابزارهای تحلیلی شامل تخمین تراکم کرنل، تحلیل لکه‌های داغ *Getis-Ord Gi و شاخص موران محلی بوده‌اند. نتایج نشان داد که بیشترین تراکم و خوشه‌بندی زلزله‌ها در غرب و جنوب‌غربی ایران و در امتداد گسل‌های زاگرس و البرز متمرکز است. همچنین، ۵۹٪ از شهرهای کشور در فاصله کمتر از ۱۴ کیلومتری از کانون‌های زلزله قرار دارند و شهرهایی مانند زرنند، خورموج و کازرون در معرض خطر بسیار بالا قرار دارند. نوآوری پژوهش در تحلیل ملی و ترکیب داده‌های گسترده با مدل‌های پیشرفته مکانی است. یافته‌ها می‌توانند در مقاوم‌سازی شهری، سیاست‌گذاری مدیریت بحران و ارتقای تاب‌آوری مناطق زلزله‌خیز به کار گرفته شوند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۸	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷	
کلمات کلیدی:	
ارزیابی خطر زلزله	
آسیب‌پذیری لرزه‌ای	
تحلیل فضایی	
GIS	
خوشه‌بندی زلزله	

مقدمه

تاریخ زمین‌شناسی بشر نشان می‌دهد که انسان همواره با مخاطرات طبیعی مانند زلزله، سیل و طوفان مواجه بوده است. در این میان، زلزله به‌عنوان پدیده‌ای غیرقابل پیشگیری، تکرارپذیر و ناگهانی، همواره یکی از تهدیدهای جدی برای جوامع انسانی محسوب می‌شود (Paton & Johnston, 2017). بر اساس گزارش سازمان بهداشت جهانی، در یک قرن گذشته بیش از ۱۱۵۰ زلزله مرگبار در ۷۵ کشور جهان ثبت شده است (Tian, Zhang, Yu & Cao, 2019). سالانه حدود ۵۰ هزار زلزله بزرگ رخ می‌دهد که برخی از آن‌ها به مناطق مسکونی آسیب جدی وارد می‌کنند (Alden, 2017). بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۳، بیش از ۱۰ درصد از زلزله‌های با شدت $M \geq 6.0$ در یک بازه ۶۰ روزه و در فاصله ۱۰۰ کیلومتری از زلزله‌ای بزرگ‌تر رخ داده‌اند (Taroni, Petrillo & Lippiello, 2025). همچنین، زلزله‌ها عامل حدود ۶۰ درصد از مرگ‌ومیر ناشی از مخاطرات طبیعی هستند و هزینه‌های هنگفتی بر جوامع تحمیل می‌کنند (Najafi Kani, 2021). بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۳، بیش از ۱۰ درصد از زلزله‌ها با بزرگی ۶ و بالاتر، در یک بازه ۶۰ روزه و در فاصله کمتر از ۱۰۰ کیلومتر از زلزله‌ای بزرگ‌تر رخ داده‌اند (Taroni et al., 2025).

ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی خود در کمربند تکتونیکی آلپ-همالیای و وجود گسل‌های فعال، از زلزله‌خیزترین کشورهای جهان است. تحلیل مکانی زلزله‌های ایران در بازه ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که بیشترین تعداد زمین‌لرزه در جنوب غرب کشور رخ داده، در حالی که زلزله‌های شدیدتر (بزرگ‌تر از ۷ ریشتر) عمدتاً در شرق و شمال غرب ایران متمرکز هستند (Ganjajean, 2024). همچنین، ساختار چین‌خوردگی‌های زاگرس با تمرکز کانون‌های زلزله رابطه مستقیم دارد (Ganjayan, 2023). بر اساس گزارش کمیته ملی کاهش اثرات بلایای طبیعی، ایران سالانه حداقل یک زلزله ۶ ریشتری و هر ۲۹ سال یک زلزله بزرگ‌تر از ۷ ریشتر را تجربه می‌کند (Najafi Kani, 2021). در فضاهای شهری، خطرپذیری به‌صورت یکنواخت توزیع نشده است و برخی نواحی از آسیب‌پذیری بیشتری برخوردارند (Maleki, Amanpour, Shojaeeyan & Razavii, 2020). تحلیل الگوهای زمانی و مکانی زلزله با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و ابزارهای GIS، قادر است به‌طور مؤثری نقاط پرریسک را شناسایی کند (Parizi, Taleai & Sharifi, 2022). در مطالعه‌ای نیز آسیب‌پذیری لرزه‌ای کلان‌شهر لیسبون با داده‌های سرشماری و GIS ارزیابی شده و روش، مورد تأیید قرار گرفته است (Xofia et al., 2024).

مطالعات متعددی در زمینه زلزله و آسیب‌پذیری شهری انجام شده است. در پژوهشی، آسیب‌پذیری شهر دهرادون با استفاده از مدل Hazus ارزیابی شده و نشان داده شده است که این مدل، ابزار مناسبی برای کاهش خسارات زلزله محسوب می‌شود (Gulati, 2006). در پژوهشی دیگر، نقش GIS و سنجش از دور در مدل‌سازی آسیب‌پذیری شهر کالیفرنیا بررسی گردیده است (Rashed, 2007). همچنین، در مطالعه‌ای، پهنه‌بندی آسیب‌پذیری زلزله پالو انجام شده و مشخص گردیده که منطقه ۲۲ بیشترین آسیب را دارد (Rusydi, Effendi & Rahmawati, 2017). در پژوهشی دیگر، تاب‌آوری کالبدی - محیطی مناطق تبریز بررسی شده و مشخص گردیده که ۱۱۵۴۶.۸۸ هکتار از مساحت شهر دارای سطح تاب‌آوری نسبتاً بالا و ۱۱۰۲.۳۹ هکتار دارای تاب‌آوری بسیار پایین است (Bahrehvar, Asgharizamani & Feizizadeh, 2023). در مطالعه‌ای، آسیب‌پذیری کاربری اراضی شهری جوانرود تحلیل شده و مشخص گردیده که حدود ۲۰ درصد از فضاهای شهری در معرض خطر متوسط تا بالا قرار دارند (Heidarifar & Mahmoudi, 2021). همچنین، فرصت‌های توسعه شهری پس از زلزله ۱۹۹۷ حاجی‌آباد بررسی شده و مشخص گردیده که شبکه ارتباطی بیشترین توسعه را داشته است (Hadiani, Hosseini & Biabani, 2021). در پژوهشی، میزان تاب‌آوری اجتماعی و کالبدی شهر ایزد بررسی شده و نشان داده شده است که نواحی شمالی و نورآباد آسیب‌پذیرترین مناطق هستند (Maleki et al., 2020). در مطالعه‌ای دیگر، تحلیل آماری زلزله‌های استان خوزستان انجام شده و مشخص گردیده که جهت وقوع زلزله‌ها از شمال غرب به جنوب شرق است (Afifi, 2020). همچنین، در پژوهشی پهنه‌بندی خطر زلزله در تبریز بررسی و مشخص شده که ۵۹.۳ درصد از شهر در معرض خطر بالا قرار دارد (Pashapour, Ghorbani, Farhadi & Daroudinia, 2019). در مطالعه‌ای، توزیع سکونتگاه‌های

شهری و روستایی در برابر زلزله در گیلان بررسی شده و مشخص گردیده که ۴۰.۷۲ درصد از مساحت استان در فاصله کمتر از ۱۵ کیلومتری گسل‌های فعال قرار دارد (Azadeh & Taghvaei, 2017). اگرچه پژوهش‌های فوق در سطح منطقه‌ای بسیار مفید بوده‌اند، اما مطالعه‌ای با رویکرد فراگیر ملی و تحلیل زمانی و مکانی زلزله‌ها در سراسر کشور، هنوز به صورت جامع انجام نشده است. این پژوهش با هدف پر کردن این خلأ طراحی شده است.

زلزله، پدیده‌ای تصادفی در بُعد زمان و مکان تلقی می‌شود که از نظر آماری و زمین‌شناسی قابل تحلیل است (Hough, 2021). تحلیل‌های فضایی - زمانی به بررسی روند وقوع زلزله در مقیاس‌های مختلف پرداخته و به شناسایی الگوهای آن کمک می‌کند (Hashemi, 2022). همچنین، زمین‌لغزش به عنوان مخاطره‌ای ثانویه با زلزله پیوند دارد؛ به‌ویژه در مناطقی با شیب بالا، بافت سست و روان‌آب‌ها (Lajmorak & Piri, 2023)، استفاده از مدل‌های ترکیبی مانند AHP و بیز برای پهنه‌بندی خطر، در مدیریت پهنه این پدیده کاربرد دارد (Nazari Bayatiani, Jafar Beglou, Mohammad Khan & Maghsoudi, 2022).

مفهوم آسیب‌پذیری، که ابتدا توسط اکیف و همکاران (O'Keefe, Westgate & Wisner, 1976) مطرح شد، به حساسیت سیستم‌های اجتماعی - اقتصادی در برابر بلایای طبیعی اشاره دارد (Liu, Zheng, Lu & Li, 2022). این مفهوم شامل جنبه‌های مختلفی از جمله تراکم جمعیت، کیفیت ساخت‌وساز و میزان تاب‌آوری زیرساخت‌ها است (Oulahen, Mortsch, O'Connell, 2019; Harford & Rutledge, 2019). شهرهای آسیب‌پذیر معمولاً دارای ساختارهای ضعیف، تراکم بالا و مدیریت ناکارآمد در برابر بحران‌ها هستند (Oulahen et al., 2019; Smith, Fearnley, Dixon, Bird & Kelman, 2023). در همین راستا، مدیریت بحران به عنوان فرآیندی جهت کاهش خسارات شامل تحلیل، برنامه‌ریزی و اجرای اقدامات فوری شناخته می‌شود (Zheng, Bi, Liu & Lowry, 2020).

در راستای تکمیل تحقیقات پیشین، هدف از این پژوهش، تحلیل فضایی - زمانی زلزله‌های ایران با تأکید بر شناسایی الگوهای توزیع مکانی و بررسی روند وقوع این مخاطره در بازه‌های زمانی مختلف است. در واقع، نوآوری پژوهش در آن است که برخلاف اغلب مطالعات پیشین که محدود به شهر یا استان خاصی بوده‌اند، این تحقیق برای نخستین بار داده‌های ۲۸ ساله زلزله را در سطح کشور، از سال ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳، تحلیل کرده و با مدل‌سازی‌های مکانی - زمانی تلفیق کرده و تصویری دقیق، کاربردی و سیاست‌پذیر برای مدیریت بحران ارائه می‌دهد. این رویکرد می‌تواند در سیاست‌گذاری کلان شهری و منطقه‌ای در مواجهه با بلایای طبیعی، به‌ویژه زلزله، مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نظر ماهیت، توصیفی - تحلیلی و از نظر روش، کمی و کاربردی است که با بهره‌گیری از تحلیل‌های آماری و مکانی انجام شده است. محدوده جغرافیایی مطالعه، تمامی پهنه سرزمینی ایران است که به دلیل قرارگیری در کمربند فعال زمین‌ساختی آلپ - هیمالیا، یکی از زلزله‌خیزترین کشورهای جهان محسوب می‌شود. بررسی‌ها براساس داده‌های زلزله‌های ثبت‌شده با بزرگی ۴ ریشتر و بالاتر در بازه زمانی ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ شمسی (۱۹۹۶-۲۰۲۴ میلادی) صورت گرفته است.

ابتدا اطلاعات زمین‌لرزه‌ها از سامانه مرکز لرزه‌نگاری کشوری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران استخراج و در قالب فایل‌های CSV گردآوری گردید. این داده‌ها شامل مختصات جغرافیایی (عرض و طول جغرافیایی)، عمق، بزرگی، زمان وقوع و محل تقریبی زلزله‌ها بود. سپس داده‌ها به محیط نرم‌افزار ArcGIS Pro منتقل و با استفاده از ابزار XY Table To Point به لایه‌های نقطه‌ای (Shapefile) تبدیل شدند.

در گام بعدی، لایه‌های پایه شامل مرزهای کشور، استان‌ها و شهرستان‌ها به پروژه افزوده شدند و داده‌های زلزله با ابزار Spatial Join به لایه‌های شهرستان‌ها پیوند خوردند تا بتوان تعداد رخدادها را در هر شهرستان محاسبه و تحلیل کرد. همچنین داده‌های مربوط به گسل‌های فعال ایران از سازمان زمین‌شناسی کشور دریافت و در محیط GIS تحلیل شد تا همپوشانی و ارتباط مکانی زلزله‌ها با ساختارهای زمین‌شناختی مورد بررسی قرار گیرد.

در مرحله تحلیل، از ابزارها و روش‌های مختلف آماری و مکانی استفاده شد. برای بررسی الگوی توزیع فضایی زمین‌لرزه‌ها، از روش تخمین تراکم کرنل^۱ برای بررسی الگوی توزیع فضایی زمین‌لرزه‌ها و تعیین مناطق با بیشترین تجمع رخدادها استفاده گردید. همچنین، تحلیل حریم^۲ برای ارزیابی تأثیر فاصله شهرها از کانون زلزله‌ها به کار رفت تا مشخص شود کدام مناطق در معرض خطر بیشتری قرار دارند. علاوه بر این، برای شناسایی نواحی دارای خوشه‌های زلزله، از روش تحلیل لکه‌های داغ^۳ استفاده شد که از شاخص Getis-Ord Gi* برای تشخیص نواحی با تراکم بالای زلزله، بهره می‌برد. در نهایت، با استفاده از ابزارهای GIS، نقشه‌های تحلیلی تولید شد که توزیع فضایی زلزله‌ها، میزان تأثیر آن‌ها بر مناطق شهری و میزان همبستگی آن‌ها با گسل‌های فعال کشور را نمایش می‌دهد.

نتایج

یافته‌های توصیفی

الف) وضعیت کلی گسل‌ها و مخاطرات لرزه‌ای ایران

الگوی توزیع فضایی گسل‌ها در ایران (شکل ۱) نشان می‌دهد که مناطق کوهستانی همچون رشته‌کوه‌های البرز، زاگرس و کپه‌داغ دارای تراکم بیشتری از گسل‌های فعال هستند. در مقابل، نواحی مرکزی کشور مانند دشت کویر و دشت لوت به دلیل ویژگی‌های زمین‌شناختی، گسل‌های کمتری دارند. این توزیع فضایی ارتباط مستقیمی با ساختار زمین‌شناسی ایران دارد که ناشی از برخورد صفحات زمین‌ساختی عربستان و اوراسیا است.

تمرکز بالای گسل‌ها در برخی مناطق نشان‌دهنده سطح بالای خطر لرزه‌ای در این مناطق است. مناطقی مانند شمال غرب، شمال و شمال شرق ایران به دلیل وجود گسل‌های فعال، مستعد زمین‌لرزه‌های مخرب هستند. این مناطق به دلیل تراکم بالای جمعیت و توسعه شهری سریع، دارای ریسک بالاتری نسبت به سایر مناطق هستند. مناطقی که دارای تراکم گسل بالا هستند نیازمند نظارت بیشتر بر فعالیت‌های ساختمانی و اجرای دقیق ضوابط ساخت‌وساز مقاوم در برابر زلزله هستند. تخلفات ساختمانی در چنین مناطقی می‌تواند به افزایش آسیب‌پذیری شهری منجر شود. همپوشانی مکانی بین مناطق دارای تخلفات ساختمانی و محدوده‌های گسلی می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی ریسک لرزه‌ای در برنامه‌ریزی شهری مورد استفاده قرار گیرد.

تحلیل فضایی تخلفات ساختمانی در مناطق زلزله‌خیز می‌تواند به شناسایی مناطق با ریسک بالای ترکیبی کمک کند. این مناطق به دلیل همزمانی عوامل طبیعی (گسل‌های فعال) و انسانی (تخلفات ساختمانی) دارای آسیب‌پذیری بالاتری هستند. نتایج این تحلیل می‌تواند مبنای تدوین برنامه‌های پیشگیرانه و اجرای طرح‌های مقاوم‌سازی شهری باشد.

ب) توزیع زمانی زمین‌لرزه‌های ایران طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ هجری شمسی

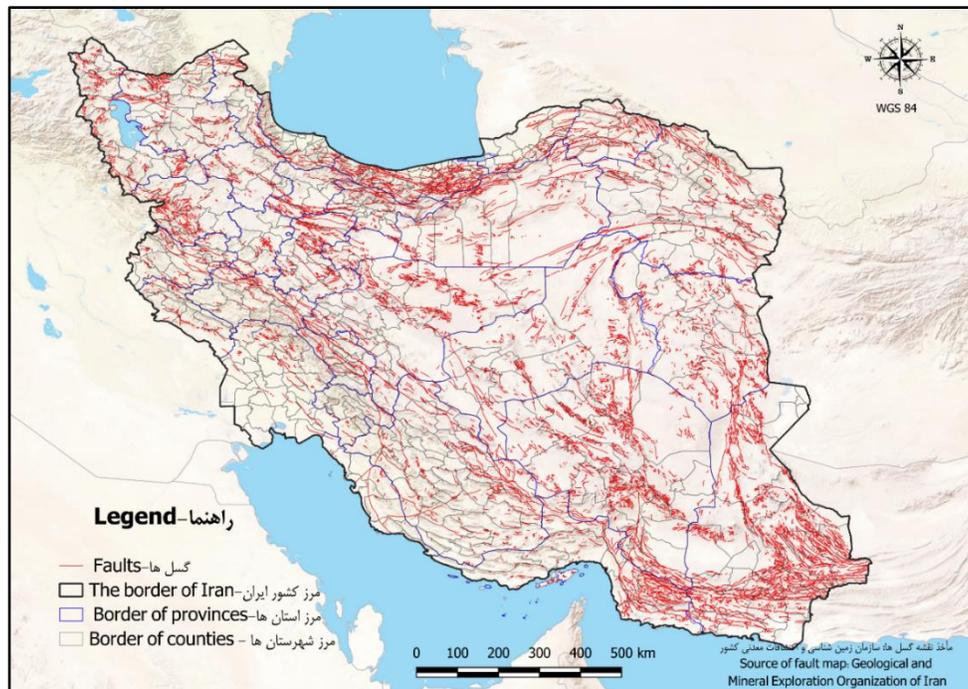
بررسی داده‌های ارائه شده در شکل ۲، نشان‌دهنده نوسانات قابل توجهی در تعداد زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده طی بازه ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ هجری شمسی است. در این دوره، کمترین تعداد زمین‌لرزه ثبت‌شده مربوط به سال‌های ۱۳۸۰ الی ۱۳۸۴ با ۹۲ رخداد است،

1- Kernel Density Estimation

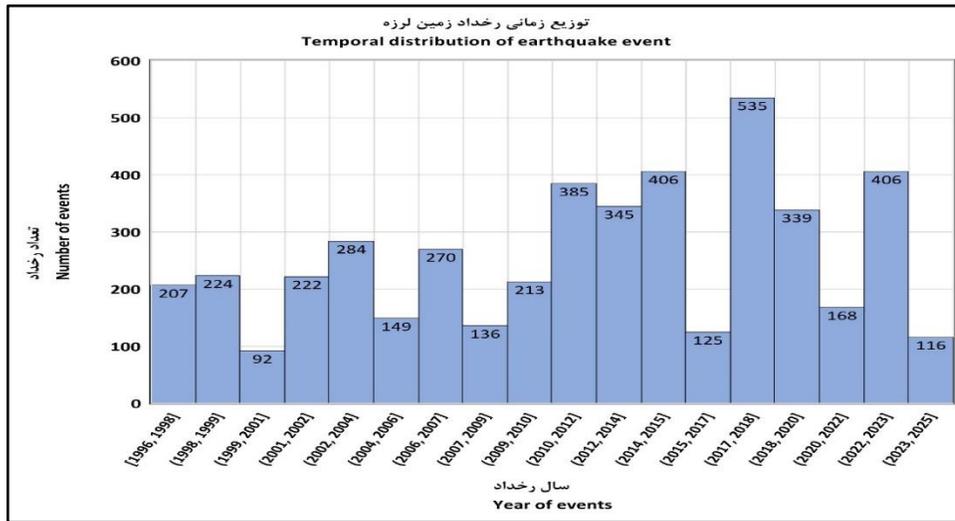
2- Buffer Analysis

3- Hot Spot Analysis

در حالی که بیشترین تعداد زمین‌لرزه در بازه ۱۴۰۰ الی ۱۴۰۳ با ۵۳۵ رخداد به ثبت رسیده است. این اختلاف بیش از ۵ برابری نشان‌دهنده تغییرات قابل‌ملاحظه در فعالیت‌های لرزه‌ای یا ظرفیت شبکه‌های پایش زلزله در طول زمان است. بررسی روند کلی نشان می‌دهد که طی دهه‌های اخیر، تعداد زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده افزایش یافته است، به طوری که میانگین سالانه رخداد زلزله در بازه ۱۳۷۵ الی ۱۴۰۳ حدود ۲۷۰ زلزله بوده است. در برخی دوره‌ها، تعداد رخداد‌های لرزه‌ای افزایش شدید داشته است، از جمله در بازه‌های ۱۳۸۵ الی ۱۳۸۹ با ۲۸۴ رخداد، ۱۳۹۰ الی ۱۳۹۴ با ۳۸۵ رخداد و ۱۳۹۵ الی ۱۳۹۹ با ۴۰۶ رخداد که می‌تواند ناشی از فعال شدن گسل‌های اصلی، افزایش تنش‌های تکتونیکی، یا بهبود شبکه‌های لرزه‌نگاری باشد. در مقابل، در بازه‌های ۱۳۸۰ الی ۱۳۸۴ با ۹۲ رخداد، ۱۳۸۵ الی ۱۳۸۹ با ۱۴۹ رخداد و ۱۴۰۰ الی ۱۴۰۳ با ۱۱۶ رخداد، کاهش چشمگیری مشاهده می‌شود که این افت می‌تواند ناشی از دوره‌های آرامش لرزه‌ای یا کاستی‌های ثبت داده در آن دوره‌ها باشد.



شکل ۱- پراکنش گسل‌های ایران
Fig.1. Distribution of Faults in Iran



شکل ۲- توزیع زمانی زمین‌لرزه‌های ایران طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ هجری شمسی (منبع: پایگاه داده‌های لرزه‌نگاری ایران)

Fig.2. Temporal distribution of earthquakes in Iran from 1996 to 2024

از دهه ۱۳۹۰ به بعد، یک روند افزایشی در تعداد رخداد‌های ثبت‌شده دیده می‌شود که احتمالاً به توسعه فناوری‌های لرزه‌نگاری و افزایش حساسیت ایستگاه‌های ثبت زلزله مرتبط است. این روند بیانگر آن است که علاوه بر تغییرات طبیعی در فعالیت‌های لرزه‌ای، پیشرفت‌های علمی و فنی نیز تأثیر قابل توجهی در افزایش ثبت و تحلیل رخداد‌های لرزه‌ای داشته‌اند. به‌طور کلی، تحلیل کمی داده‌های ارائه‌شده نشان می‌دهد که تغییرات قابل توجهی در فعالیت لرزه‌ای ایران طی این سال‌ها رخ داده است و برخی دوره‌ها شاهد افزایش شدید زلزله‌ها بوده‌اند که می‌تواند به فعال شدن گسل‌های مهم و افزایش تنش‌های زمین‌ساختی مرتبط باشد. از سوی دیگر، در برخی سال‌ها کاهش چشمگیری در تعداد زلزله‌های ثبت‌شده مشاهده می‌شود که ممکن است به دوره‌های آرامش نسبی پوسته زمین یا محدودیت‌های تاریخی در ثبت زلزله‌ها مرتبط باشد.

ج) توزیع مکانی زمین‌لرزه‌های ایران با بزرگی ۴ ریشتر و بالاتر

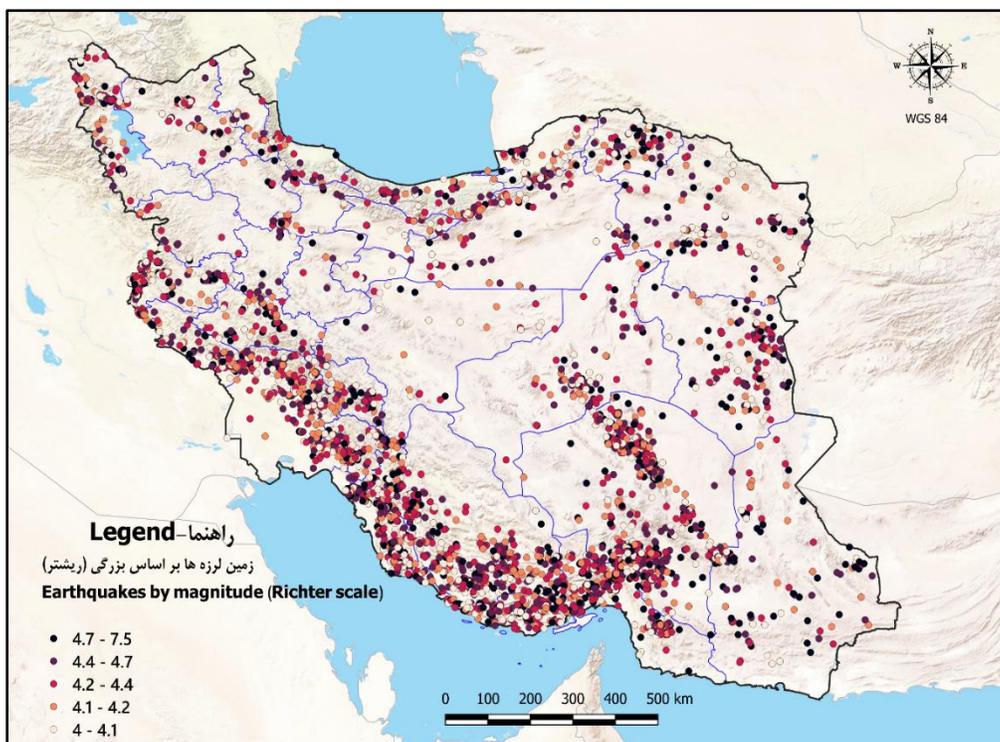
نقشه توزیع زمین‌لرزه‌ها با بزرگی ۴ ریشتر و بیشتر در ایران (شکل ۳) الگوی فضایی لرزه‌خیزی در مناطق مختلف کشور را نشان می‌دهد. تراکم زمین‌لرزه‌ها در مناطق شمال غرب، شمال، جنوب غرب و شرق ایران به دلیل قرارگیری بر روی گسل‌های فعال بیشتر است، در حالی که نواحی مرکزی کشور دارای تراکم کمتری هستند. زمین‌لرزه‌های با بزرگی بالای ۴ ریشتر عمدتاً در امتداد گسل‌های فعال و نواحی کوهستانی رخ داده‌اند. مناطق البرز، خراسان، زاگرس و جنوب ایران بیشترین رخداد‌های لرزه‌ای را نشان می‌دهند که ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی است. توزیع فضایی زمین‌لرزه‌ها در مناطق شرقی و جنوب شرقی نیز بیانگر فعال بودن گسل‌های امتداد لغز است. تراکم بالای زمین‌لرزه‌ها در برخی مناطق شهری، ضرورت مقاوم‌سازی را افزایش می‌دهد. همپوشانی مناطق لرزه‌خیز با تخلفات ساختمانی می‌تواند شاخصی برای ارزیابی ریسک باشد.

د) توزیع مکانی زمین‌لرزه‌های ایران بر اساس عمق (کیلومتر)

نقشه توزیع عمق زمین‌لرزه‌ها در ایران (شکل ۴) نشان‌دهنده ویژگی‌های زمین‌ساختی مناطق مختلف است. زمین‌لرزه‌های کم‌عمق (کمتر از ۱۰ کیلومتر) معمولاً خسارت بیشتری به مناطق مسکونی وارد می‌کنند، در حالی که زمین‌لرزه‌های عمیق‌تر با دامنه انتشار وسیع‌تر، تأثیر کمتری بر سطح زمین دارند.

تحلیل نقشه، نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌های کم‌عمق با تراکم بالاتر در مناطق زاگرس، البرز و شمال‌شرق ایران ثبت شده‌اند. این مناطق به دلیل فعالیت گسل‌های سطحی و ساختار زمین‌شناسی پیچیده، مستعد وقوع زمین‌لرزه‌های کم‌عمق هستند. در جنوب ایران و به ویژه مناطق نزدیک به خلیج فارس، عمق زمین‌لرزه‌ها بیشتر است که با فعالیت‌های تکتونیکی در ارتباط با مرز صفحات عربستان و اوراسیا همخوانی دارد. در نواحی شرقی ایران مانند منطقه مکران و جنوب شرق، زمین‌لرزه‌های عمیق‌تری مشاهده می‌شود که ناشی از فروانش صفحه عمان به زیر صفحه اوراسیا است. این رخدادها معمولاً با بزرگی بیشتر و عمق زیاد همراه هستند، اما خسارت کمتری به مناطق مسکونی وارد می‌کنند.

زمین‌لرزه‌های کم‌عمق در مناطق پرجمعیت و شهری تهدید جدی‌تری برای زیرساخت‌های شهری محسوب می‌شوند. در مناطقی که تخلفات ساختمانی و ساخت‌وسازهای غیرمجاز وجود دارد، احتمال افزایش خسارت ناشی از این نوع زمین‌لرزه‌ها بیشتر است. بنابراین، نظارت دقیق‌تر بر ساخت‌وسازها و رعایت استانداردهای مقاوم‌سازی در این مناطق ضروری به نظر می‌رسد.

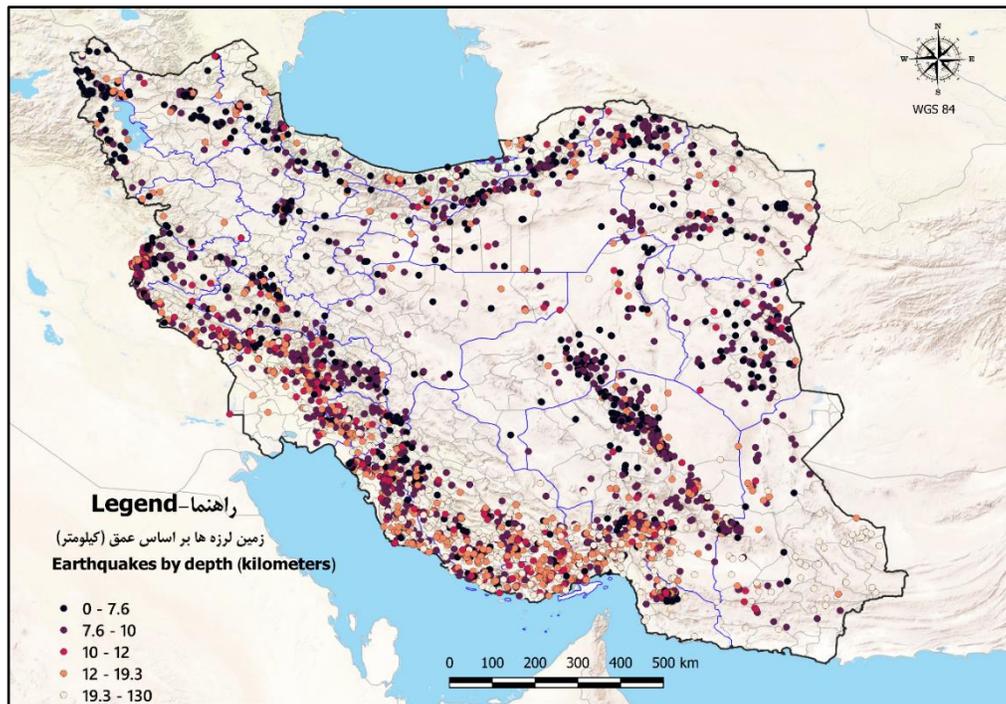


شکل ۳- پراکنش زمین‌لرزه‌های ایران با بزرگی ۴ ریشتر و بالاتر

Fig.3. Distribution of Earthquakes in Iran with Magnitude 4 and Above

الگوی فضایی عمق زمین‌لرزه‌ها می‌تواند برای ارزیابی خطرپذیری مناطق مختلف و تدوین برنامه‌های کاهش خطر زلزله مورد استفاده قرار گیرد. تمرکز زمین‌لرزه‌های کم‌عمق در مناطق زلزله‌خیز نیازمند اجرای سیاست‌های مدیریت بحران، مقاوم‌سازی

ساختمان‌ها و افزایش آگاهی عمومی درباره نحوه مقابله با حوادث طبیعی است. بررسی ارتباط بین عمق زمین‌لرزه‌ها، پراکنش تخلفات ساختمانی و توزیع جمعیت می‌تواند به اولویت‌بندی مناطق آسیب‌پذیر و بهبود برنامه‌های مدیریت بحران کمک کند.



شکل ۴- پراکنش زمین‌لرزه‌های ایران بر اساس عمق (کیلومتر)

Fig.4. Distribution of Earthquakes in Iran Based on Depth (Kilometers)

یافته‌های تحلیلی

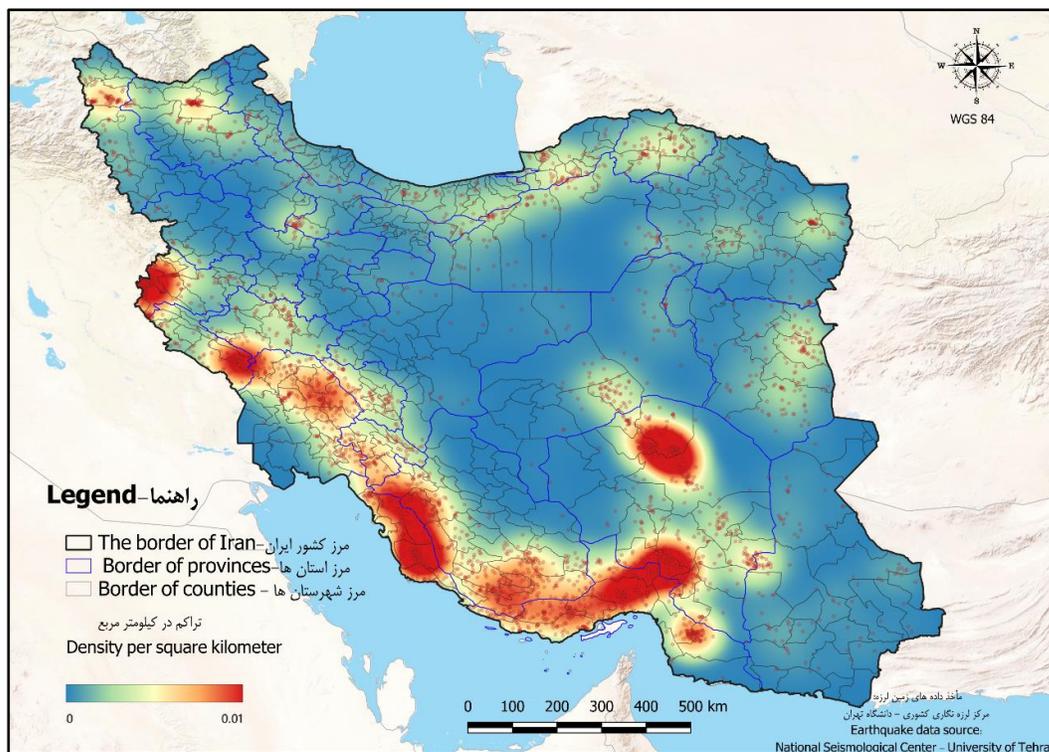
الف) تحلیل تراکم فضایی زمین‌لرزه‌ها (تحلیل تراکم کرنل)

نقشه تراکم کرنل زمین‌لرزه‌های ایران (شکل ۵) که با استفاده از داده‌های مرکز لرزه‌نگاری کشوری دانشگاه تهران تهیه شده، نشان‌دهنده توزیع فضایی زمین‌لرزه‌ها در سراسر کشور است. این نقشه، تراکم زمین‌لرزه‌ها را از طریق طیف رنگی از آبی (کمترین تراکم) تا قرمز (بیشترین تراکم) به تصویر کشیده و مناطق دارای لرزه‌خیزی بالا را مشخص کرده است. تحلیل این نقشه نشان می‌دهد که بیشترین تمرکز زمین‌لرزه‌ها در امتداد رشته‌کوه زاگرس مشاهده می‌شود. این منطقه که از شمال غرب تا جنوب غرب کشور امتداد دارد، تحت تأثیر گسل‌های فعال و برخورد صفحات تکتونیکی عربستان و اوراسیا قرار دارد. استان‌هایی مانند کرمانشاه، لرستان، چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد و فارس در این ناحیه قرار گرفته‌اند و به دلیل فعالیت بالای گسل‌ها، از مناطق مستعد وقوع زمین‌لرزه محسوب می‌شوند. علاوه بر این، نوار جنوبی کشور، به‌ویژه استان‌های هرمزگان و سیستان و بلوچستان، نیز دارای تراکم بالای زمین‌لرزه هستند. این امر به دلیل حضور گسل‌های فعال در امتداد سواحل خلیج فارس و دریای عمان است که موجب زلزله‌های مکرر در این نواحی شده است. یکی دیگر از نقاط پرلرزه ایران، استان کرمان است که به دلیل وجود چندین گسل فعال، از جمله گسل‌های جبال بارز و نایبند، همواره در معرض زلزله‌های شدید قرار دارد. همچنین، مناطق شمال غرب ایران شامل استان‌های آذربایجان غربی و شرقی نیز دارای

تراکم متوسط تا بالایی از زلزله هستند که به دلیل فعالیت گسل‌های اصلی مانند گسل تبریز است. در مقابل، بخش‌هایی از مرکز و شرق کشور دارای تراکم پایین‌تری از زمین‌لرزه‌ها بوده و فعالیت لرزه‌ای در این مناطق نسبتاً کمتر است.

از منظر شهرسازی و برنامه‌ریزی شهری، نقشه تراکم زلزله‌های ایران اهمیت بالایی در مدیریت ریسک و کاهش آسیب‌های ناشی از زلزله دارد. شهرهای واقع در مناطق قرمز این نقشه باید دارای الزامات سختگیرانه‌تری در طراحی سازه‌ها و اجرای استانداردهای مقاوم‌سازی ساختمان باشند. توسعه زیرساخت‌های مقاوم، نظیر ساختمان‌های ضدزلزله و شبکه‌های خدماتی ایمن، از جمله اقدامات ضروری در این مناطق است. برنامه‌ریزی شهری باید به گونه‌ای باشد که از گسترش بی‌رویه شهرها در مناطق پرخطر جلوگیری کرده و به جای آن، الگوهای توسعه پایدار را در دستور کار قرار دهد.

نتایج این تحلیل، می‌تواند به تدوین راهکارهای کاهش آسیب‌پذیری مناطق پرخطر و ارتقای سطح ایمنی در برابر زلزله کمک کند. مقایسه این نقشه با داده‌های گسل‌های فعال، جمعیت‌شناسی و توسعه شهری می‌تواند منجر به ارائه مدل‌های بهینه برای کاهش خسارات و بهبود تاب‌آوری شهرها در برابر زمین‌لرزه شود. از این رو، پژوهش‌های آتی باید به بررسی دقیق‌تر رابطه میان توزیع فضایی زلزله‌ها و برنامه‌ریزی شهری پرداخته و راهکارهای اجرایی برای کاهش مخاطرات زلزله در ایران ارائه دهند.



شکل ۵- نقشه توزیع تراکم فضایی زمین‌لرزه‌ها در ایران بر اساس روش کرنل تراکم

Fig.5. Spatial Density Distribution of Earthquakes in Iran Based on Kernel Density Estimation

ب) تحلیل لکه‌های داغ: آماره-Ord-Getis* Gi*

نقشه ارائه شده در شکل ۶، تحلیل لکه‌های داغ و سرد زمین‌لرزه‌های ایران را نمایش می‌دهد که از طریق تحلیل آماری و روش‌های خوشه‌بندی فضایی به دست آمده است. در این تحلیل، فیلد ورودی داده‌های زمین‌لرزه‌های ثبت شده در سطح کشور در نظر گرفته شد و برای مفهوم‌سازی فضایی، روش Zone of Indifference انتخاب گردید. این روش امکان در نظر گرفتن تأثیرات مکانی زمین‌لرزه‌ها را فراهم می‌کند و باعث می‌شود نقاطی که به‌طور نسبی بیشترین یا کمترین رخدادهای لرزه‌ای را تجربه کرده‌اند، در یک دسته‌بندی فضایی مشخص قرار گیرند.

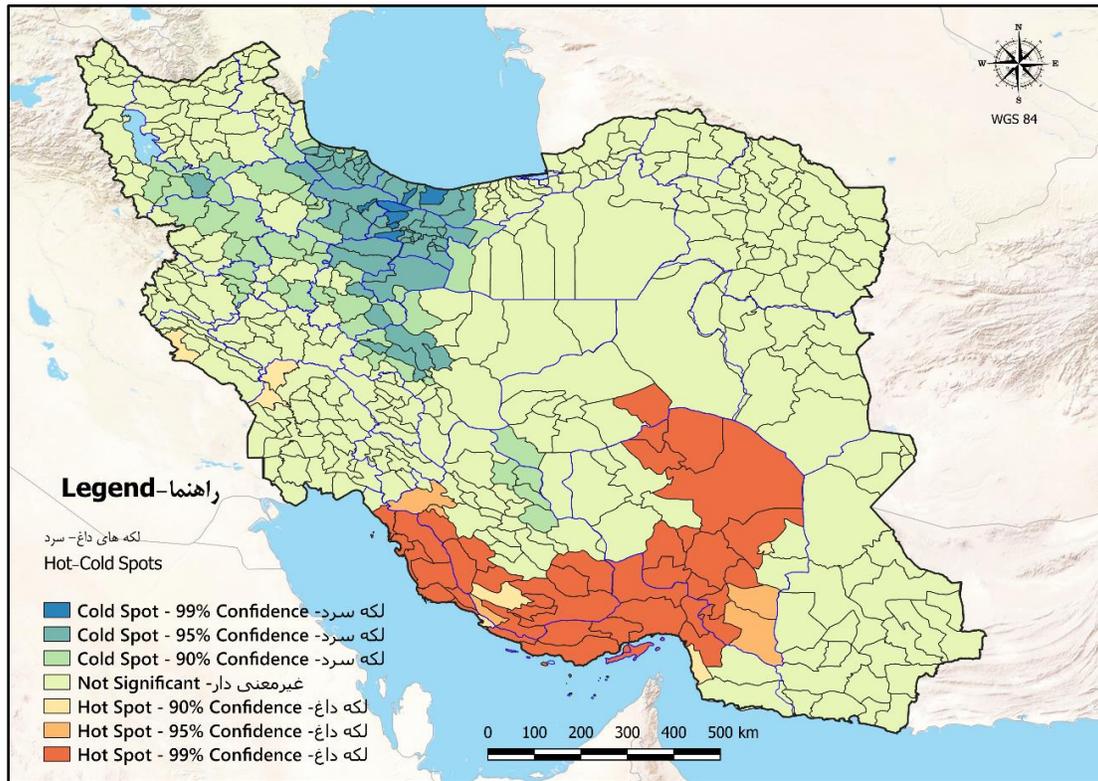
بر این اساس، نقشه نشان می‌دهد که مناطق مختلف کشور از نظر تمرکز و توزیع زمین‌لرزه‌ها دارای الگوهای مشخصی هستند و بر اساس سطح اطمینان به مناطق لکه‌های داغ^۱ و لکه‌های سرد^۲ تقسیم شده‌اند. لکه‌های داغ (قرمز و نارنجی) نشان‌دهنده نواحی با زمین‌لرزه‌های متمرکز و همجوار هستند، در حالی که لکه‌های سرد (آبی) مناطق با پراکندگی کمتر زمین‌لرزه را مشخص می‌کنند. این روش صرفاً توزیع مکانی زمین‌لرزه‌های گذشته و نحوه خوشه‌بندی آن‌ها را نمایش می‌دهد و لزوماً به معنای افزایش احتمال وقوع زلزله در آینده نیست.

نتایج تحلیل نشان می‌دهد که نواحی جنوب و جنوب شرقی کشور، از جمله استان‌های هرمزگان، کرمان، سیستان و بلوچستان و بخش‌هایی از فارس، به عنوان لکه‌های داغ زلزله با سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ مشخص شده‌اند. این موضوع نشان‌دهنده فعالیت بالای زمین‌لرزه در این مناطق است که به دلیل حضور گسل‌های فعال، مانند گسل مکران و گسل‌های هرمزگان، رخ می‌دهد. این نواحی به دلیل برخورد صفحات تکتونیکی و شکست‌های ساختاری مستعد زمین‌لرزه‌های مکرر و شدید هستند.

در مقابل، مناطق شمال غربی و بخش‌هایی از غرب ایران، از جمله استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، اردبیل و زنجان، به عنوان لکه‌های سرد زلزله شناسایی شده‌اند. این مناطق دارای سطح لرزه‌خیزی پایین‌تری هستند و بر اساس تحلیل آماری، فعالیت زمین‌لرزه‌ای آن‌ها نسبت به سایر مناطق کمتر است.

بخش‌های مرکزی و شمال شرقی کشور، از جمله تهران، اصفهان و خراسان رضوی، در دسته مناطق غیرمعنی‌دار قرار گرفته‌اند که نشان می‌دهد فعالیت زلزله در این نواحی از نظر آماری قابل توجه نیست. اما این به معنای عدم خطر زلزله در این مناطق نیست، بلکه نشان‌دهنده این است که تراکم زمین‌لرزه‌ها در این نقاط به اندازه لکه‌های داغ بالا یا لکه‌های سرد پایین نیست.

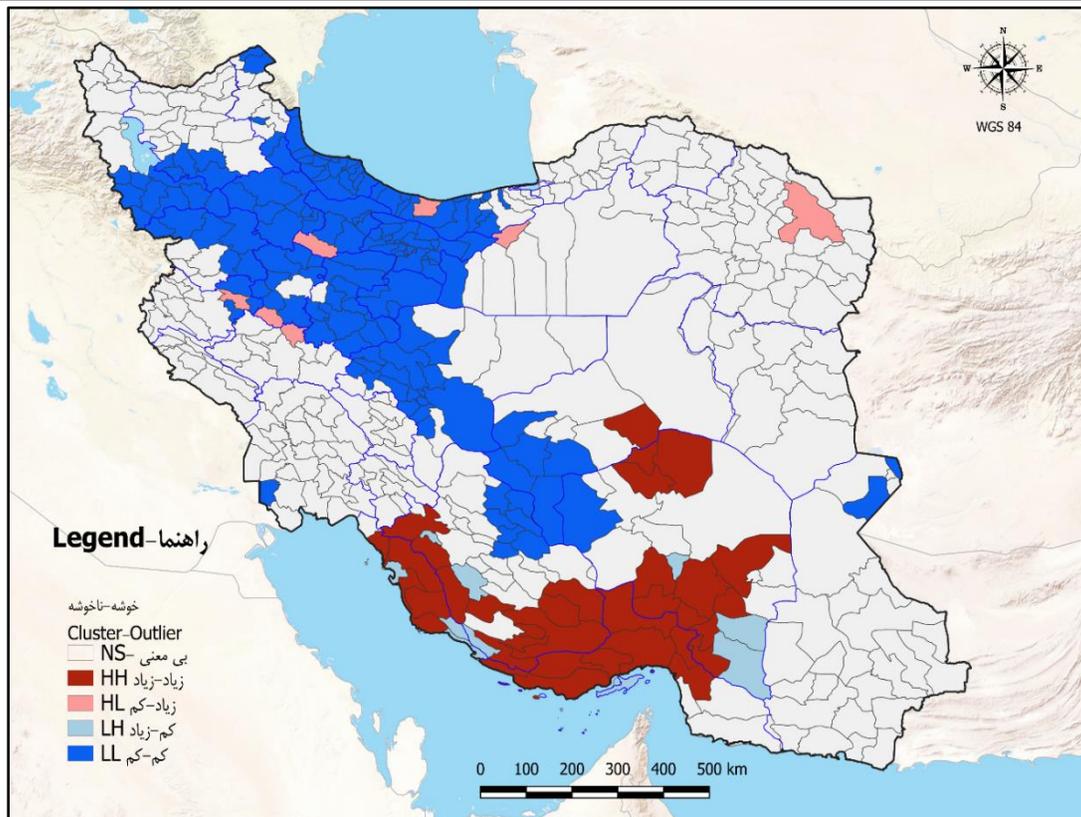
از منظر برنامه‌ریزی شهری و مدیریت بحران، این نقشه اهمیت بالایی در تدوین استراتژی‌های کاهش ریسک دارد. مناطق لکه‌های داغ باید تحت نظارت‌های شدید مهندسی زلزله قرار گیرند و الزامات ساخت‌وساز مقاوم در برابر زلزله برای این نواحی به‌طور جدی‌تر اعمال شود. در مقابل، در مناطق لکه‌های سرد، تمرکز بر سایر مخاطرات طبیعی مانند سیل یا فرونشست زمین می‌تواند اولویت داشته باشد.



شکل ۶- نقشه لکه های داغ و سرد زمین لرزه های ایران
Fig.6. Hot and Cold Spots Map of Earthquakes in Iran

ج) الگوی فضایی زمین لرزه ها با روش خوشه - ناخوشه: تحلیل موران محلی انسلین^۱
نقشه ارائه شده در شکل ۷، تحلیل خوشه بندی فضایی زمین لرزه های ایران را نشان می دهد که مناطق مختلف را بر اساس تراکم و شدت وقوع زلزله به دسته های معنادار طبقه بندی کرده است. این تحلیل به شناسایی الگوهای مکانی زلزله های پرتکرار و کم تکرار کمک کرده و از این طریق امکان درک بهتری از پراکندگی خطرات لرزه ای را فراهم می آورد. نقشه، شامل پنج دسته اصلی خوشه بندی است که در آن مناطق «زیاد-زیاد (HH)» و «کم-کم (LL)» نمایانگر بالاترین و پایین ترین تراکم زلزله هستند، در حالی که سایر دسته ها نشان دهنده مناطق گذار یا ناهنجاری های مکانی در توزیع زلزله ها هستند.

1- Anselin's Local Moran's I



شکل ۷- نقشه خوشه-ناخوشه زمین‌لرزه‌های ایران (تحلیل موران محلی انسلین)

Fig.7. Cluster and Outlier Map of Earthquakes in Iran (Anselin's Local Moran's I Analysis)

تحلیل نقشه نشان می‌دهد که مناطق جنوبی و جنوب شرقی ایران، از جمله استان‌های هرمزگان، فارس، کرمان، سیستان و بلوچستان و بوشهر، در دسته «زیاد-زیاد (HH)» قرار گرفته‌اند. این نواحی دارای بیشترین فراوانی زمین‌لرزه‌ها هستند و به عنوان نقاط بحرانی از نظر فعالیت لرزه‌ای شناخته می‌شوند. وجود گسل‌های فعال مانند زاگرس و مکران باعث افزایش زلزله‌های مکرر شده و نیاز به برنامه‌ریزی دقیق برای مقاوم‌سازی و مدیریت بحران را ضروری می‌سازد. در مقابل، مناطق شمالی و شمال غربی کشور، از جمله استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، زنجان، کردستان و بخش‌هایی از خراسان شمالی، در گروه «کم - کم (LL)» قرار گرفته‌اند. این مناطق دارای لرزه‌خیزی پایینی هستند و از نظر آماری کمترین تراکم زلزله را دارند. دلیل این وضعیت می‌تواند به پایداری نسبی ساختار زمین‌شناسی و فاصله از گسل‌های فعال مرتبط باشد.

علاوه بر این، برخی مناطق در دسته «زیاد-کم (HL)» و «کم-زیاد (LH)» قرار دارند. مناطق «زیاد-کم (HL)»، که به صورت پراکنده در نقشه دیده می‌شوند، نشان‌دهنده مناطقی هستند که نسبت به مناطق اطراف خود فعالیت لرزه‌ای بیشتری دارند اما در کل تراکم زلزله در آن‌ها کمتر است. این مناطق نیاز به بررسی دقیق‌تری دارند زیرا احتمال دارد که گسل‌های نهفته یا لرزه‌های نهفته در آن‌ها فعال شوند. از سوی دیگر، مناطق «کم-زیاد (LH)»، که در شمال شرق کشور و برخی نقاط مرکزی دیده می‌شوند، مناطقی هستند که به‌طور کلی لرزه‌خیزی پایینی دارند اما در برخی نقاط فعالیت زلزله‌ای بالاتر از حد انتظار است. این نقشه در برنامه‌ریزی شهری و مدیریت بحران برای تعیین اولویت‌های مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها و تخصیص منابع اهمیت دارد. مناطق «زیاد - زیاد» باید به‌عنوان نقاط بحرانی مقاوم‌سازی شوند، در حالی که در مناطق «کم - کم» تمرکز بر مخاطرات ژئوتکنیکی مانند فرونشست یا سیل باید اولویت یابد. مناطق گذار نیز نیاز به مطالعه دقیق برای شناسایی تغییرات لرزه‌ای دارند.

د) تحلیل لکه‌های داغ و چندضلعی‌های منظم برای شناسایی کانون‌های پرخطر زلزله در ایران

نقشه شکل ۸، نشان‌دهنده توزیع خطر زمین‌لرزه در ایران با استفاده از روش تحلیل لکه‌های داغ و مدل‌سازی مبتنی بر چندضلعی‌های منظم است. به منظور افزایش دقت در شناسایی کانون‌های پرخطر، از روش Generate Hexagons برای ایجاد واحدهای فضایی کوچک با مساحت ۲۰۰ کیلومتر مربع استفاده شده است. این امر باعث شده که مناطق پرریسک با جزئیات بیشتری مشخص شوند و بتوان شهرهای مختلف را بر اساس میزان خطرپذیری لرزه‌ای دسته‌بندی کرد.

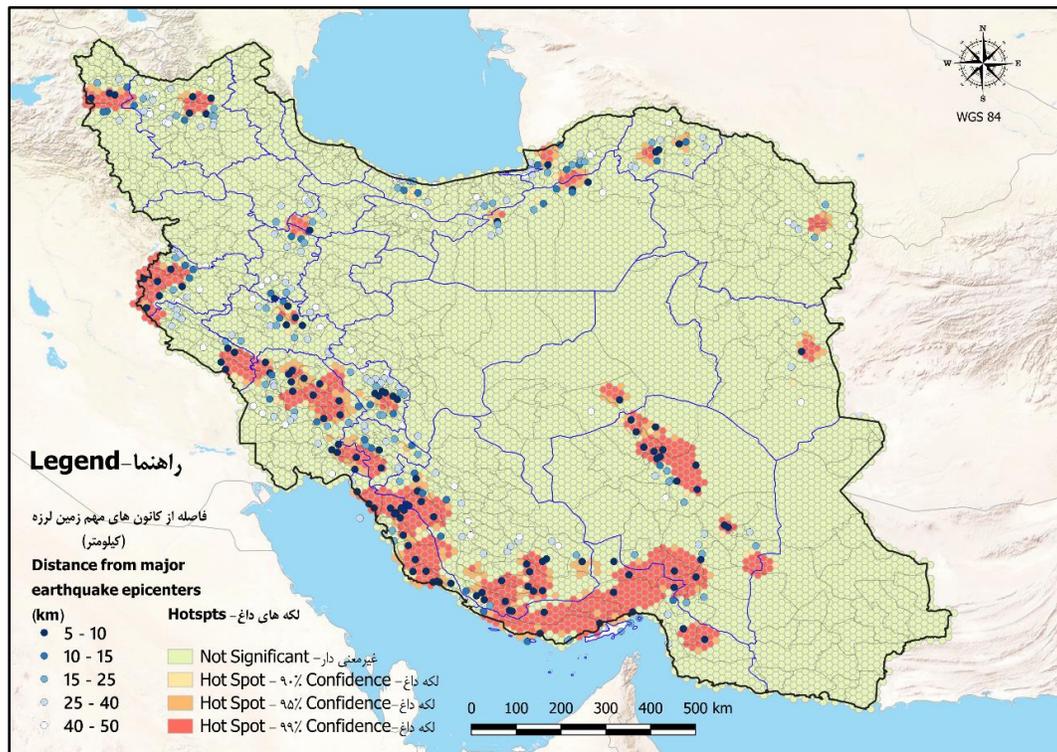
بر اساس نتایج این تحلیل، بیشترین تمرکز زلزله‌ها در نواحی غربی، جنوب غربی، و جنوب شرقی کشور مشاهده می‌شود. این مناطق، که عمدتاً در امتداد گسل‌های فعال مانند زاگرس، مکران، و دیگر ساختارهای تکتونیکی قرار دارند، بیشترین احتمال وقوع زلزله‌های مخرب را دارند. همچنین، نقشه نشان می‌دهد که بسیاری از شهرهای ایران در فاصله نزدیک به کانون‌های زلزله قرار گرفته‌اند، که این امر خطر آسیب‌پذیری سازه‌ها و زیرساخت‌ها را به شدت افزایش می‌دهد.

تحلیل لکه‌های داغ نشان می‌دهد که بیشترین فعالیت لرزه‌ای در جنوب و غرب کشور، به‌ویژه در استان‌های فارس، بوشهر، کهگیلویه و بویراحمد، کرمانشاه و لرستان متمرکز است. این مناطق به دلیل گسل‌های فعال، با اطمینان ۹۹ درصدی در معرض زلزله‌های مکرر قرار دارند. همچنین، سواحل خلیج فارس و دریای عمان به دلیل نزدیکی به گسل مکران و گسل‌های فرعی مرتبط، در معرض خطر بالای زمین‌لرزه و سونامی هستند.

روش تحلیل چندضلعی‌های منظم در این نقشه کمک کرده تا نقاط داغ لرزه‌ای در مقیاسی کوچک‌تر مورد بررسی قرار گیرند. این امر نه تنها باعث افزایش دقت شناسایی مناطق پرخطر شده است، بلکه امکان مقایسه شهرهای مختلف و میزان نزدیکی آن‌ها به مراکز زلزله را نیز فراهم کرده است. در نتیجه، این روش می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای برنامه‌ریزی شهری و مدیریت بحران مورد استفاده قرار گیرد.

از نظر آماری، مناطق قرمز در این نقشه، نشان‌دهنده بیشترین میزان خطر زلزله هستند، در حالی که مناطق زرد و آبی با کاهش تدریجی خطر همراه هستند. مناطق با فاصله کمتر از ۱۴ کیلومتر از کانون‌های زلزله، بیشترین میزان خطر را نشان می‌دهند، اما باید توجه داشت که حتی در فاصله‌های بیشتر از ۴۰ کیلومتر نیز زلزله‌های قدرتمند می‌توانند خسارات قابل توجهی ایجاد کنند.

نتایج این تحلیل برای سیاست‌گذاران، مهندسان زلزله و مدیران بحران بسیار مفید بوده و با شناسایی دقیق نقاط داغ زمین‌لرزه، امکان تدوین استراتژی‌های مقاوم‌سازی، بهبود مدیریت بحران و تخصیص بهینه منابع را فراهم می‌کند. علاوه بر این، اجرای سیستم‌های هشدار سریع، افزایش آگاهی عمومی و وضع قوانین سخت‌گیرانه‌تر در ساخت‌وساز می‌تواند نقش مهمی در کاهش خسارات جانی و مالی ایفا کند. این نقشه ضرورت توجه به مناطق پرخطر زلزله در ایران را نشان داده و بر اهمیت برنامه‌ریزی علمی برای کاهش آسیب‌ها تأکید دارد. استفاده از روش‌های تحلیلی مبتنی بر داده‌های فضایی و لکه‌های داغ، شناخت بهتر الگوهای لرزه‌ای و بهبود سیاست‌های مدیریت بحران را امکان‌پذیر کرده و در نهایت به افزایش تاب‌آوری شهرهای ایران در برابر زلزله منجر می‌شود.

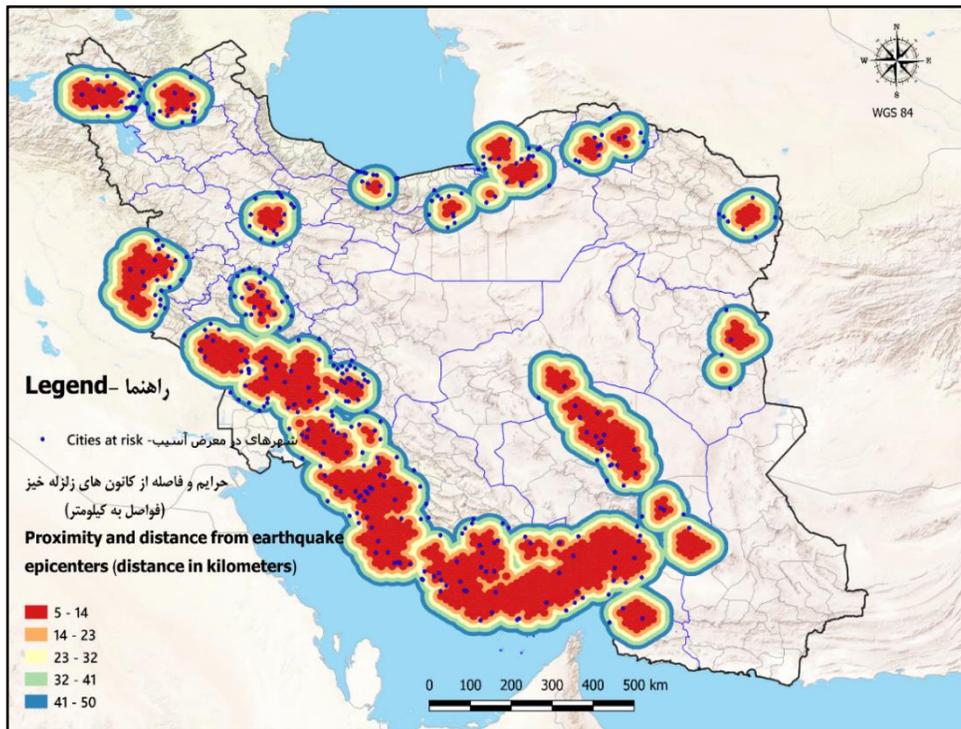


شکل ۸- شهرهای در معرض خطر آسیب پذیری ناشی از زمین لرزه بر اساس تحلیل لکه های داغ و چندضلعی های منظم
Fig.8. Cities at Risk of Earthquake Vulnerability Based on Hotspot Analysis and Regular Polygons

ه) تحلیل لکه های داغ و چندضلعی های منظم برای شناسایی کانون های پرخطر زلزله در ایران

در شکل شماره ۹، با استفاده از روش لکه های داغ و مدل سازی چندضلعی های منظم، کانون های پرخطر زلزله در ایران شناسایی شده است. با تمرکز بر شهرهای آسیب پذیر، ابتدا نقاط مرکزی لکه های داغ، که در جدول اطلاعات توصیفی دارای مقادیر ۱ تا ۳ هستند، استخراج شد. این نقاط به عنوان کانون های لرزه خیز اصلی در نظر گرفته شده و برای بررسی تأثیر آنها، از روش Centroids جهت تعیین مرکز دقیق این مناطق استفاده شده است. سپس با بهره گیری از تکنیک Multi Buffers، محدوده هایی از ۱ تا ۵۰ کیلومتر پیرامون این نقاط ایجاد شد. این محدوده ها به داده های شهری متصل شده تا مشخص شود کدام شهرها در این حریم قرار گرفته اند و هر شهر در چه فاصله ای از مراکز لرزه خیزی واقع شده است.

نتایج این تحلیل نشان می دهد که شهرهای واقع در فاصله ۰ تا ۱۴ کیلومتری از کانون های زلزله خیز (حریم قرمز) بیشترین خطر را دارند، در حالی که شدت خطر با افزایش فاصله کاهش می یابد. با این حال، تجربه زمین لرزه های گذشته نشان داده که حتی شهرهایی که در فاصله ۴۰ کیلومتری یا بیشتر از این کانون ها قرار دارند، در صورت وقوع زلزله های شدید ممکن است دچار آسیب های جدی شوند، به ویژه در مناطقی که دارای زیرساخت های مقاوم نیستند. تحلیل نقشه ها و مدل سازی فضایی نشان می دهد که بیشترین تجمع کانون های خطر در نواحی غربی، جنوب غربی و جنوب شرقی کشور قرار دارد. مناطق وسیعی از زاگرس، سواحل خلیج فارس و دریای عمان، و بخش هایی از شمال کشور در محدوده قرمز قرار گرفته اند که نشان دهنده بیشترین میزان خطر زلزله در این مناطق است. ارتباط این کانون ها با گسل های فعال کشور، به ویژه گسل زاگرس و گسل مکران، نقش تعیین کننده ای در لرزه خیزی این مناطق دارد.



شکل ۹- شهرهای در معرض خطر آسیب پذیری ناشی از زمین لرزه بر اساس تحلیل لکه های داغ و محدوده های حریم خطر

Fig.9. Cities at Risk of Earthquake Vulnerability Based on Hotspot Analysis and Hazard Buffer

شهرهای متعددی از جمله در استان های فارس، کرمان، کهگیلویه و بویراحمد، لرستان، ایلام، بوشهر و هرمزگان در این محدوده ها شناسایی شده اند که در طی سال های ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ بیشترین زلزله ها را با بزرگی ۴ و بیشتر تجربه کرده اند. همچنین، استان های شمالی از جمله مازندران، گلستان و گیلان به دلیل تراکم جمعیت بالا و توسعه شهری گسترده، در معرض خطر جدی زمین لرزه قرار دارند. این تحلیل، علاوه بر تأیید شهرستان های پرخطر، تأکید اصلی خود را بر شهرهایی که مستقیماً در محدوده های خطر زلزله واقع شده اند، معطوف کرده است.

از منظر برنامه ریزی شهری و مدیریت بحران، این اطلاعات می تواند به تدوین سیاست های مؤثرتر در جهت مقاوم سازی زیرساخت ها، بهینه سازی مدیریت بحران، و تخصیص منابع برای کاهش آسیب پذیری کمک کند. توسعه سیستم های هشدار سریع، برنامه ریزی شهری مبتنی بر تحلیل های لرزه ای، و اجرای قوانین سخت گیرانه تر در ساخت و ساز از جمله اقداماتی هستند که می توانند به کاهش میزان تلفات جانی و مالی کمک کنند. در نهایت، این نقشه ها تصویری دقیق از پراکندگی خطر زلزله در ایران ارائه می دهند و می توانند به عنوان ابزاری کلیدی در سیاست گذاری های مرتبط با کاهش خطرات لرزه ای و توسعه پایدار مورد استفاده قرار گیرند.

ز) بررسی اولویت بندی شهرهای در معرض خطر زلزله

تحلیل داده های شهری و زلزله (جدول ۱)، نشان می دهد که شهرهایی مانند وحدتیه، خورموج، راور، زرنده و کوه بنان در فاصله ۵ کیلومتری از کانون های زلزله قرار دارند و بالاترین میزان خطر را تجربه می کنند. همچنین، شهرهایی مانند نورآباد، قائمیه، کازرون، و خواجه در فاصله ۱۰ کیلومتری قرار گرفته و در دسته خطر بالا محسوب می شوند. علاوه بر این، شهرهایی مانند جیرفت، فهرج، و شهرکرد در فاصله ۲۵ تا ۴۰ کیلومتری از کانون زلزله قرار داشته و همچنان آسیب پذیر هستند. این اولویت بندی نشان می دهد که بخش عمده ای از شهرهای پرخطر در استان های فارس، کرمان، بوشهر، و هرمزگان متمرکز شده اند که به دلیل نزدیکی به گسل های فعال زاگرس و مکران، احتمال وقوع زلزله های شدید در آن ها بالا است.

علاوه بر این، تحلیل داده‌های زلزله با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی و تحلیل خوشه‌بندی فضایی تأیید می‌کند که شهرها با فاصله کمتر از ۱۴ کیلومتر از کانون‌های زلزله، بیشترین ریسک خسارت سازه‌ای و جانی را دارند. این نتایج اهمیت اجرای سیاست‌های مقاوم‌سازی زیرساختی، بهینه‌سازی مدیریت بحران، توسعه سیستم‌های هشدار سریع، و سخت‌گیری در قوانین ساخت‌وساز را نشان می‌دهد. در نهایت، نقشه‌ها و تحلیل‌های ارائه‌شده، تصویری دقیق از پراکندگی خطر زلزله در ایران ارائه می‌دهند که می‌توانند در سیاست‌گذاری‌های مرتبط با کاهش خطرات لرزه‌ای و توسعه پایدار شهری مورد استفاده قرار گیرند.

بحث

هدف اصلی این پژوهش، تحلیل فضایی- زمانی زلزله‌های ایران در بازه زمانی ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ شمسی و شناسایی مناطق پرخطر از نظر توزیع مکانی و شدت لرزه‌ها بود. برای این منظور، از روش‌های تحلیل فضایی شامل تخمین تراکم کرنل، تحلیل لکه‌های داغ $Getis-Ord Gi^*$ و خوشه‌بندی فضایی $Anselin's Local Moran's I$ استفاده شد. یافته‌های پژوهش نشان داد که بیشترین تراکم زلزله‌ها در مناطق غربی، جنوب غربی و جنوب شرقی ایران، به‌ویژه در امتداد گسل‌های زاگرس، مکران و البرز مشاهده می‌شود. نتایج تحلیل خطرپذیری شهری نیز نشان داد که ۵۹ درصد از شهرهای ایران در فاصله کمتر از ۱۴ کیلومتری از کانون‌های زلزله قرار دارند و شهرهایی مانند زرنند، خورموج و کازرون در فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتری از مراکز لرزه‌خیز واقع شده‌اند، که این امر احتمال خسارات شدید را افزایش می‌دهد.

تحلیل تراکم کرنل نشان داد که بالاترین تراکم زمین‌لرزه‌ها در استان‌های فارس، کرمان، بوشهر و کهگیلویه و بویراحمد مشاهده شده است. این نتایج با پژوهش گنجائیان (Ganjaeian, 2023) که تأکید کرده بود فعالیت لرزه‌ای در این نواحی به دلیل حضور گسل‌های فعال بالا است، همخوانی دارد. همچنین، یافته‌های این پژوهش با نتایج بهره‌ور و همکاران (Bahrehvar et al., 2023) تطابق دارد که نشان داده‌اند شهرهای با رشد سریع شهری و تراکم بالای جمعیت، در معرض خطر بیشتری قرار دارند. علاوه بر این، پژوهش لجم اورک و پیری (Lajmorak & Piri, 2023) نیز به نقش ویژگی‌های توپوگرافی و تکتونیکی در تشدید فعالیت‌های لرزه‌ای در ایران اشاره کرده است، که یافته‌های این مطالعه نیز اهمیت این عوامل را در توزیع زلزله‌ها تأیید می‌کند.

نتایج تحلیل لکه‌های داغ نشان داد که نواحی جنوب و جنوب شرقی ایران، به‌ویژه استان‌های هرمزگان، کرمان و سیستان و بلوچستان، بیشترین سطح خوشه‌بندی لرزه‌ای را دارند. این یافته‌ها با پژوهش‌هایی که به نقش گسل مکران و دیگر ساختارهای فعال جنوب ایران اشاره کرده‌اند، همخوانی دارد. از سوی دیگر، برخی از یافته‌های این پژوهش با مطالعات پیشین مغایرت‌هایی دارد. برای مثال، گنجائیان (Ganjaeian, 2024) تأکید کرده بود که بیشترین تراکم زلزله‌ها در شمال شرق ایران مشاهده می‌شود، در حالی که نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که این ناحیه، فعالیت لرزه‌ای متوسطی دارد. این تفاوت ممکن است ناشی از اختلاف در دوره‌های زمانی داده‌های مورد استفاده یا تفاوت در روش‌های تحلیلی باشد. همچنین، برخی پژوهش‌ها مانند تحقیق راشد و همکاران (Rashed et al., 2007) بیان کرده‌اند که شهرهای مرکزی ایران نسبت به مناطق کوهستانی کمتر تحت تأثیر زلزله قرار دارند، اما این پژوهش نشان داد که برخی شهرهای مرکزی، به‌ویژه آن‌هایی که در نزدیکی گسل‌های فعال قرار دارند، همچنان در معرض خطر بالایی هستند. این اختلاف می‌تواند به بهبود دقت روش‌های تحلیلی جدید، استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری به‌روز و تفاوت در معیارهای ارزیابی آسیب‌پذیری شهری مرتبط باشد.

تحلیل همبستگی فضایی $Moran's I$ نشان داد که بسیاری از شهرهای پرجمعیت کشور در نواحی با الگوی خوشه‌بندی لرزه‌ای معنادار قرار دارند. این موضوع تأیید می‌کند که رابطه مستقیمی بین توسعه شهری و افزایش آسیب‌پذیری لرزه‌ای وجود دارد. با این حال، در برخی مناطق مانند بخش‌هایی از شمال شرق ایران، خوشه‌بندی لرزه‌ای معناداری مشاهده نشد، که می‌تواند به عواملی مانند تغییرات در تنش‌های تکتونیکی، عمق کانون زلزله‌ها یا کیفیت داده‌های ثبت‌شده مرتبط باشد.

جدول ۱- شهرهای ایران در معرض خطر زمین‌لرزه بر اساس فاصله از کانون‌های لرزه‌ای

Table 1 – Iranian Cities at Earthquake Risk Based on Proximity to Seismic Epicenters

ردیف Row	اسم شهر City Name	فاصله از کانون‌ها Distance from Epicenters(Km)	مقدار ریسک‌پذیری Risk Level	ردیف Row	اسم شهر City Name	فاصله از کانون‌ها Distance from Epicenters(Km)	مقدار ریسک‌پذیری Risk Level
1	وحدتیه Vahdatiyeh	5	Very High Risk	21	ورزقان Varzeqan	5	Very High Risk
2	خورموج Khormuj	5	Very High Risk	22	بهاباد Bahabad	5	Very High Risk
3	کوه بنان Kuh Banan	5	Very High Risk	23	خشت Khesht	5	Very High Risk
4	راور Ravar	5	Very High Risk	24	جویم Juyom	5	Very High Risk
5	زرند Zarand	5	Very High Risk	25	لار Lar	5	Very High Risk
6	شلمزار Shalamzar	5	Very High Risk	26	اشکنان Ashkanan	5	Very High Risk
7	گهرو Gahro	5	Very High Risk	27	بنک Bonak	5	Very High Risk
8	ناغان Naghan	5	Very High Risk	28	پیر شهر Pir Shahr	5	Very High Risk
9	خوی Khoy	5	Very High Risk	29	بندر گارک Bandar Gark	5	Very High Risk
10	حاجی آباد Hajiabad	5	Very High Risk	30	انکهرن Ankahara n	5	Very High Risk
11	بندرعباس Bandar Abbas	5	Very High Risk	31	فارغان Farghan	5	Very High Risk
12	دهلران Dehloran	5	Very High Risk	32	شجدک Shojadak	5	Very High Risk
13	دوگنبدان Dogonbada n	5	Very High Risk	33	زیارتعلی Ziyarat Ali	5	Very High Risk
14	تازه آباد Tazehabad	5	Very High Risk	34	سردشت Sardasht	5	Very High Risk
15	سرپل ذهاب Sarpol-e Zahab	5	Very High Risk	35	امام حسن Emam Hasan	10	Very High Risk
16	سالند Saland	5	Very High Risk	36	بندرگناوه Bandar Genaveh	10	Very High Risk
17	شوشتر Shushtar	5	Very High Risk	37	بندر ریگ Bandar Rig	10	Very High Risk
18	زاغه Zagheh	5	Very High Risk	38	شبانکاره Shabankar eh	10	Very High Risk

19	جوشقان Jowshaqan	5	Very High Risk	39	دالکی Dalki	10	Very High Risk
20	اسدیه Asadieh	5	Very High Risk	40	سعدآباد Saadabad	10	Very High Risk

این یافته‌ها نشان‌دهنده ضرورت اجرای سیاست‌های مقاوم‌سازی شهری، توسعه زیرساخت‌های ایمن و مدیریت بحران مؤثر در مناطق پرخطر است. مشخص شد که حتی شهرهایی که در فاصله ۲۵ تا ۴۰ کیلومتری از کانون زلزله‌های مخرب قرار دارند، همچنان در معرض خطر هستند. این موضوع بر اهمیت پایش لرزه‌ای و برنامه‌ریزی دقیق برای مدیریت بحران تأکید دارد. نتایج این پژوهش می‌تواند در تدوین استراتژی‌های اولویت‌بندی مناطق پرخطر و تخصیص منابع برای کاهش آسیب‌های ناشی از زلزله مؤثر باشد. با وجود یافته‌های ارزشمند، این پژوهش با برخی محدودیت‌ها نیز همراه بوده است. از جمله، عدم دسترسی به داده‌های دقیق درباره ویژگی‌های سازه‌ای و کیفیت ساخت‌وساز شهری موجب شد ارزیابی مستقیم‌تری از میزان تاب‌آوری کالبدی مناطق شهری انجام نگردد. همچنین، تمرکز تحقیق بر زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۴ و بالاتر، باعث شد زلزله‌های کوچک‌تر که می‌توانند نقش مهمی در انباشت تنش‌ها و تحریک گسل‌ها داشته باشند، مورد توجه قرار نگیرند. به علاوه، تأثیر شرایط ژئوتکنیکی، نوع خاک و لایه‌های زمین‌شناختی در شدت مخاطره به صورت جداگانه بررسی نشد.

با این حال، پژوهش حاضر با تحلیل فضایی و زمانی بیش از ۱۰ هزار زمین‌لرزه در بازه‌ای بلندمدت و در سطح ملی، سهم معناداری در ارتقای ادبیات علمی مربوط به مخاطرات لرزه‌ای ایران دارد. استفاده از رویکردهای تلفیقی در سامانه GIS و بهره‌گیری از مدل‌های آماری، امکان ترسیم الگوهای دقیق‌تری از خوشه‌های پرخطر را فراهم کرده که می‌تواند در تدوین سیاست‌های مکان‌محور مقاوم‌سازی، اولویت‌بندی شهری و پایش خطر مؤثر واقع شود. از این جهت، پژوهش حاضر نه تنها به شناسایی دقیق‌تر نواحی پرخطر پرداخته بلکه ابزارهایی برای برنامه‌ریزی بهتر در سطح کلان و محلی پیشنهاد می‌دهد.

پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با گسترش داده‌های مورد استفاده به حوزه‌های ژئوتکنیکی، سازه‌ای و اجتماعی، به تحلیل چندبعدی آسیب‌پذیری لرزه‌ای بپردازند. همچنین ترکیب داده‌های تاریخی زلزله با روش‌های یادگیری ماشین و مدل‌های پیش‌بینی مکانی-زمانی می‌تواند زمینه را برای طراحی سیستم‌های هشدار سریع و مدیریت هوشمند بحران فراهم سازد. استفاده از سناریوهای شبیه‌سازی و سنجش ظرفیت پاسخ‌گویی شهری، از دیگر مسیرهای پیشنهادی برای ادامه این مسیر پژوهشی است که می‌تواند به تقویت تاب‌آوری ساختاری و نهادی شهرهای ایران بپردازد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، الگوی فضایی و زمانی زمین‌لرزه‌های ایران طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ با استفاده از ابزارهای تحلیل مکانی بررسی شد. نتایج نشان داد که در این بازه زمانی، بیش از ۱۰ هزار زمین‌لرزه با بزرگی ۴ ریشتر و بالاتر ثبت شده که ۲۵ مورد از آن‌ها دارای بزرگای بیش از ۶.۵ ریشتر بوده‌اند. چگالی رخدادهای لرزه‌ای عمدتاً در مناطق غربی و جنوبی کشور از جمله استان‌های هرمزگان، کرمان، فارس و کهگیلویه و بویراحمد متمرکز است.

تحلیل لکه‌های داغ نشان داد که حدود ۵۹ درصد از شهرهای کشور در فاصله کمتر از ۱۴ کیلومتری از کانون‌های زلزله قرار دارند. شهرهایی نظیر زرنند، خورموج، راور و کازرون در نزدیکی کانون‌های فعال قرار گرفته‌اند و شهرهایی چون جیرفت، فهرج و شهرکرد نیز علی‌رغم فاصله بیشتر، همچنان در معرض خطر بالا هستند. همچنین بیش از ۷۰ درصد از زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده دارای عمق کمتر از ۱۵ کیلومتر بوده‌اند که احتمال تخریب شدید مناطق شهری را افزایش می‌دهد. در مقابل، برخی زلزله‌های عمیق‌تر در جنوب کشور اگرچه خسارات سطحی کمتری داشته‌اند، اما بالقوه می‌توانند خطر سونامی را به همراه داشته باشند.

یافته‌های پژوهش، ضرورت بازنگری در سیاست‌های مدیریت بحران را برجسته می‌سازد. مقاوم‌سازی بافت شهری، نظارت بر ساخت‌وساز، توسعه زیرساخت‌های ایمن، گسترش سامانه‌های هشدار سریع، و پایش مداوم گسل‌ها از جمله اقدامات ضروری هستند. بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند GIS و هوش مصنوعی نیز می‌تواند در پیش‌بینی خطر و تحلیل سناریوهای آینده نقش کلیدی داشته باشد. در نهایت، بازنگری در برنامه‌ریزی شهری و ارتقاء تاب‌آوری اجتماعی از طریق آموزش عمومی و برنامه‌های پیشگیری، می‌تواند به کاهش آسیب‌پذیری شهرهای ایران در برابر زلزله کمک شایانی کند.

حامی مالی

هزینه‌های مطالعه حاضر توسط نویسندگان مقاله تأمین شد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

- Afifi, M. E. (2020). Earthquake spatial statistics analysis and its adaptation to faults and quaternary loess sediments using GIS (Case of study Khuzestan province). *Regional Planning*, 10(38), 179-190. [In Persian] <https://sanad.iau.ir/Journal/jzpm/Article/1157929>
- Alden, A. (2017). How many strong earthquakes occur annually? ThoughtCo. <https://www.thoughtco.com/geologic-maps-of-the-united-states-4122863/>
- Azadeh, S. R., Taghvaei, M. (2017). Spatial analysis of vulnerability in urban and rural settlements against earthquake hazard Case Study: Guilan Province. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 4(3), 71-84. [In Persian] <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2750-fa.html>
- Bahrevar, H., Asgharizamani, A., & Feizizadeh, B. (2023). Comparative comparison and leveling of physical-environmental resilience of urban fabric in ten districts of Tabriz city in against earthquake using spatial analysis-decision-making combined models. *Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 2(5), 77-55. [In Persian] https://rsgi.tabrizu.ac.ir/article_16444.html
- Ganjaeian, H. (2023). Analysis of the tectonic status of the northwestern Zagros anticlines and its relationship with seismic centers. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(4), 275-290. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75370.1182>
- Ganjaeian, H. (2024). Spatial and temporal analysis of earthquakes in Iran During the years 1907 to 2023. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4), 222-243. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoeh.2024.87246.1470>
- Gulati, B. (2006). Earthquake risk assessment of buildings: applicability of HAZUS in Dehradun, India. *Enschede, ITC*, 109. <https://purl.utwente.nl/essays/101997>
- Hadiani, Z., Hosseini, S. A., & Biabani, F. (2021). Identification and Evaluation of Physical Development Opportunities of Earthquake of Hajiabad City, Zirkuh Township. *Urban Structure and Function Studies*, 8(26), 191-213. [In Persian] <https://doi.org/10.22080/usfs.2021.3124>
- Hashemi, S. N. (2022). Statistical Modeling of the Migrating Pattern of the Occurrence of Successive Earthquakes in the Zagros Region. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 8(4), 93-103. [In Persian] <https://doi.org/10.48303/bese.2021.243812>
- Heidarifar, M. R., & Mahmoudi, A. (2021). Analysis of Javanrud Urban Land Use Vulnerability to Earthquake, Using Network Analysis (ANP) and Geographic Information System (GIS). *Human Geography Research*, 53(1), 119-137. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jhgr.2019.279271.1007898>

- Hough, S. E. (2021). Contributed reports of widely felt earthquakes in California, United States: If they felt it, did they report it?. *Frontiers in Earth Science*, 9, 770445. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.770445>
- Lajmorak, M., & Piri, Z. (2023). Landslide hazard zoning using Hierarchical Analysis Process (AHP) Model and GIS technology (Case study: Baghmalek County). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(3), 193-215. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.77009.1239>
- Liu, Y., Zheng, J., Lu, H., & Li, X. (2022). Vulnerability assessment and spatio-temporal dynamics analysis of agricultural flood in China. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 902968. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.902968>
- Maleki, S., Amanpour, S., Shojaeeyan, A., & Razavii, M. (2020). Surveying and measuring the physical and social resilience to earthquakes (Case study of Izeh City). *Urban Structure and Function Studies*, 7(22), 81-111. [In Persian] <https://doi.org/10.22080/usfs.2019.15917.1743>
- Najafi Kani, A. (2021). Analyzing the Resilience of Rural Settlements against Earthquakes: A Case Study of Mountainous and Plain Villages of Amol County in Iran. *Village and Development*, 24(3), 172-196. [In Persian] <https://doi.org/10.30490/rvt.2020.342639.1212>
- Nazari Bayatiani, F., Jafar Beglou, M., Mohammad Khan, S., & Maghsoudi, M. (2022). Landslide Hazard Zonation in Kolar Region Using Bayes' Theorem-ANP Hybrid Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(2), 1-21. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2021.69988.1048>
- O'Keefe, P., Westgate, K., & Wisner, B. (1976). Taking the Naturalness Out of Natural Disasters. *Nature*, 260(5552), 566-567. <https://doi.org/10.1038/260566a0>
- Oulahen, G., Mortsch, L., O'Connell, E., Harford, D., & Rutledge, A. (2019). Local practitioners' use of vulnerability and resilience concepts in adaptation to flood hazards. *Climatic Change*, 153(1), 41-58. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02386-w>
- Parizi, S. M., Taleai, M., & Sharifi, A. (2022). A GIS-Based Multi-Criteria Analysis Framework to Evaluate Urban Physical Resilience against Earthquakes. *Sustainability*, 14(9), 5034. <https://doi.org/10.3390/su14095034>
- Pashapour, H., Ghorbani, R., Farhadi, E., & Daroudinia, A. (2019). Zoning the Hazards of Earthquake Using Geographical Information System (A Case Study of Tabriz Metropolis). *Environmental Based Territorial Planning (Amayesh)*, 12(45), 49-70. [In Persian] https://journals.iau.ir/article_668103.html
- Paton, D., & Johnston, D. (2017). *Disaster resilience: an integrated approach*. Charles C Thomas Publisher. https://www.ccthomas.com/details.cfm?P_ISBN13=9780398091699
- Rashed, T., Weeks, J., Couclelis, H., & Herold, M. (2007). An integrative GIS and remote sensing model for place-based. *Integration of GIS and Remote Sensing*, 199. <https://B2n.ir/p60774>
- Rusydi, H., Effendi, R., & Rahmawati, R. (2017). Vulnerability zoning of earthquake disaster of Palu. *International Journal of Science and Applied Science: Conference Series*, 1(2), 137-143. <https://doi.org/10.20961/ijsascs.v1i2.5138>
- Smith, K., Fearnley, C. J., Dixon, D., Bird, D. K., & Kelman, I. (2023). *Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster*. London: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781351261647>
- Taroni, M., Petrillo, G., & Lippiello, E. (2025). Earthquake Size Distributions of Strong Worldwide Seismicity Are Similar for Background and Triggered Events. *Seismological Research Letters*. <https://doi.org/10.1785/0220240481>
- Tian, Q., Zhang, S., Yu, H., & Cao, G. (2019). Exploring the factors influencing business model innovation using grounded theory: The case of a Chinese high-end equipment manufacturer. *Sustainability*, 11(5), 1455. <https://doi.org/10.3390/su11051455>
- Xofia, M., Ferreira, T. M., Domingues, J. C., Santos, P. P., Pereira, S., Oliveira, S. C., ... & Lourenço, P. B. (2024). On the seismic vulnerability assessment of urban areas using Census data: The Lisbon Metropolitan Area as a

pilot study area. *Journal of Earthquake Engineering*, 28(1), 242–265.
<https://doi.org/10.1080/13632469.2023.2197078>

Zheng, B., Bi, G., Liu, H., & Lowry, P. B. (2020). Corporate crisis management on social media: A morality violations perspective. *Journal of Heliyon*, 6(7), 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04435>



Dam Construction in the Light of Green Criminology: A Content Analysis of the Novel *After the Cloud*

Hamid Reza Danesh Nari ^{1*}, Abolfazl Sherafati ²

¹ Assistant Professor, Department of Criminal Law and Criminology, Faculty of Law and Political Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² M.Sc. Student, Department of Criminal Law and Criminology, Faculty of Law and Political Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 27 May 2025

Revised: 29 July 2025

Accepted: 30 July 2025

Available Online: 31 July 2025

Keywords:

Green Criminology

Environmental Crimes

Dam Construction

Indigenous Communities

Environmental Justice

ABSTRACT

Environmental issues have become one of the major concerns of various sciences in recent decades. Criminology, as a branch of the social sciences, is not indifferent to these issues. Contemporary critical criminology has introduced new topics to the field, one of which is environmental damage and protection. The importance of these issues is so great that it has led to the formation of a new branch in criminology, called green criminology. In this research, using the qualitative content analysis method, the novel *After the Cloud* by Babak Zamani was analyzed based on the theory of green criminology, with an emphasis on the environmental damage caused by dam construction. The results of this study indicate that dam construction projects, both during construction and afterwards, have negative environmental consequences that can result in ecosystem destruction. Dam construction can also lead to forced displacement due to rising water levels and the submergence of indigenous peoples' habitats. In this context, the lack of government support makes indigenous people the main victims of unregulated dam construction.

* Corresponding author: Dr. Hamid Reza Danesh Nari

E-mail address: daneshnari@um.ac.ir

How to cite this article: Danesh Nari, H. R., & Sherafati, A. (2025). Dam Construction in the Light of Green Criminology: A Content Analysis of the Novel *After the Cloud*. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 190-210. <https://doi.org/10.22067/GEOEH.2025.93741.1576>



©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 theory of green criminology was first proposed by Michael Lynch in 1990. In an article titled “*The Greening of Criminology*,” he focused on environmental crimes and analyzed them with a critical eye. Environmental crimes are a broad concept that, in addition to economic damage, also violate the right to a healthy environment. Theorists in this field believe that because environmental crimes are often accompanied by widespread damage and sometimes restoration to the original state is impossible, the best solution is prevention and proactive measures.

One of the important topics in the analysis of environmental crimes is the issue of political economy, which emphasizes two areas. First, it examines the role and activities of the state that facilitate or create conditions for environmental destruction and damage. These issues are related to public policymaking and the constant intervention of governments. Second, it explores the decisive role of capitalism in production and its methods, which are in conflict with the environment. Therefore, environmental crimes are increasingly associated with the ideology of capitalism. For this reason, green criminology has a pessimistic view of capitalism, consumer culture, and social contradictions, reflecting its critical and Marxist nature.

The development and operation of hydroelectric power plants and large dams are often accompanied by serious and widespread social consequences that are rarely properly identified or assessed. In many cases, responsible institutions do not adequately address the negative impacts of these projects on the lives of local communities. Since the 1970s, awareness of the environmental, economic, and social impacts of dams has increased. The World Commission on Dams (WCD) warned more than two decades ago that the construction of large dams without sufficient attention to social consequences has caused widespread damage, including the displacement of millions of people, loss of livelihoods, and deterioration in the quality of life. Moreover, in most cases, compensation for indigenous people has been inadequate, and efforts to restore their living conditions have failed.

This research aims to examine and evaluate the novel *After the Cloud* in the light of green criminology theory, using qualitative content analysis. The novel, written by Babak Zamani in the style of social realism, primarily explores the consequences of dam construction. The main research question is: How are environmental damage and the negative consequences of dam construction represented in this realistic novel? What roles do power and wealth groups play in the occurrence and escalation of environmental crimes?

Material and Methods

This study employs qualitative content analysis to examine data related to critical criminology in the novel *After the Cloud*. Qualitative content analysis is a suitable method for analyzing textual data in large volumes and in specific contexts. Through this method, the most important categories of the text are identified, and its hidden meanings are uncovered. By coding and categorizing the data, theoretical concepts can be tested and their validity assessed. Since the success of qualitative content analysis depends on the precise and purposeful selection of categories, which must align with the hypotheses and theoretical framework of the research, the categories in this study were chosen to directly correspond to the concepts and concerns of green criminology. Each category reflects one of the theoretical dimensions of this approach in explaining environmental crimes and damage.

Results and Discussion

The research findings are presented under three categories: (1) dam construction in the light of green criminology, (2) environmental crimes of the powerful, and (3) victimization of indigenous people, followed by (4) the sociological harms of dam construction projects.

Dam projects clearly demonstrate human rights violations against indigenous and local communities. These projects, ostensibly undertaken for the development and exploitation of water resources and energy production, often violate the fundamental rights of affected populations. The loss of agricultural land,

homes, and water resources that generations have relied on to sustain their livelihoods is just one example of these violations. Indigenous and local communities are forcibly displaced, separated from their natural environment, and stripped of their cultural and social identity. Furthermore, inadequate attention to their post-displacement well-being—such as the absence of jobs, education, and social infrastructure—creates conditions in which basic human rights are violated. In *After the Cloud*, dam construction is presented by the company as a project for development, but in reality, it results in environmental destruction, mountain explosions, and the burial of plant species and agricultural lands.

A common shortcoming of dam projects is the lack of commitment by government officials to the resettlement of displaced people. Research shows that many villagers forcibly displaced by dam construction emphasize the role of government officials in their loss of capital and property. The institutional structure of these projects has a serious impact on how resettlement and other development-related issues are addressed. In *After the Cloud*, one of the author's main concerns is the lack of accountability of companies and the government. The irreparable damage caused to the natural environment and residents goes largely unanswered, and no institution holds companies accountable.

In green criminology, the concept of harm is also central. It goes beyond the violation of official laws to include socially harmful practices, even if the law does not classify them as crimes. In *After the Cloud*, social harms appear in various forms. The dam projects in this novel are not limited to environmental destruction; they also reveal widespread social harms. The lives of local people, who had developed their land and gardens for years, are suddenly submerged, and their lifelong efforts destroyed. The jobs promised are short-term, unstable, and degrading, undermining the future of the youth in these regions. Promises of employment and development soon give way to unemployment, poverty, forced migration, and family collapse.

Conclusion

This novel helps readers better understand the concept of state and corporate crimes in a critical sense—by drawing attention to harms that are ignored in the official discourse of society. In this way, it expands the perspective on crime from its traditional and narrow definition to a broader, critical one in which crime includes all harmful practices of powerful groups, regardless of whether they are criminalized by law. In contemporary capitalism, the close relationship between large corporations and governments has created a cycle of environmental crimes in which the economic interests of capitalists take precedence over human rights and the environment. This power structure enables corporations to implement projects such as the construction of large dams with government support and permits. Although these projects are justified by goals such as energy supply, economic development, and natural resource management, in practice they have devastating consequences for nature and human societies, particularly indigenous peoples.



دسترسی آزاد

نشریه علمی جغرافیا و مخاطرات محیطی

DOI: 10.22067/GEOEH.2025.93741.1576

مقاله پژوهشی



سدسازی در پرتو جرم‌شناسی سبز: تحلیل محتوای رمان «بعد از ابر»

حمیدرضا دانش‌ناری^{۱*}، ابوالفضل شرافتی^۲

^۱ استادیار گروه حقوق جزا و جرم‌شناسی، دانشکده حقوق و علوم سیاسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد حقوق کیفری و جرم‌شناسی، دانشکده حقوق و علوم سیاسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۸	موضوعات زیست‌محیطی یکی از دغدغه‌های مهم علوم مختلف در دهه‌های اخیر به شمار می‌آید. جرم‌شناسی نیز به عنوان یکی از شاخه‌های علوم اجتماعی، نسبت به این مسائل بی‌تفاوت نیست. جرم‌شناسی انتقادی معاصر موضوعات نوینی را با قلمروی جرم‌شناسی پیوند زده است که آسیب‌های زیست‌محیطی و حمایت از محیط زیست یکی از آنها می‌باشد. اهمیت این مسائل به قدری است که موجب شکل‌گیری شاخه‌ای جدید در جرم‌شناسی تحت عنوان جرم‌شناسی سبز شده است. در این پژوهش، با استفاده از روش تحلیل محتوای کیفی، رمان «بعد از ابر» اثر بابک زمانی، بر اساس نظریه جرم‌شناسی سبز و با تأکید بر آسیب‌های زیست‌محیطی سدسازی، تحلیل می‌شود. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که پروژه‌های ساخت سد، چه در زمان ساخت و چه بعد از آن، دارای پیامدهای زیست‌محیطی منفی هستند که می‌توانند موجب تخریب اکوسیستم شوند. همچنین، ساخت سدها می‌تواند منجر به کوچ اجباری به دلیل بالا آمدن سطح آب و زیر آب رفتن محل سکونت بومیان شود. در این بستر، عدم حمایت‌های دولتی، بومیان را به قربانیان اصلی ساخت سدهای غیر اصولی بدل می‌کند.
کلمات کلیدی: جرم‌شناسی سبز جرایم زیست محیطی سدسازی جوامع بومی عدالت زیست محیطی	

مقدمه

در دهه‌های اخیر، آسیب‌های زیست‌محیطی به یکی از جدی‌ترین چالش‌های جهانی تبدیل شده‌اند؛ چالشی که مرزهای جغرافیایی را پشت سر گذاشته و به بحرانی فراگیر با پیامدهایی گسترده در ابعاد طبیعی، اقتصادی، اجتماعی و سیاسی بدل شده است. تغییرات اقلیمی، آلودگی منابع آب و خاک، جنگل‌زدایی، نابودی تنوع زیستی، فرسایش زمین و افزایش گازهای گلخانه‌ای تنها نمونه‌هایی از

این بحران‌ها هستند که حیات انسان و سایر گونه‌های زنده را به طور مستقیم تهدید می‌کنند. این وضعیت، نشان دهنده بهره برداری بی‌رویه و ناپایدار از منابع طبیعی و فقدان رویکرد پیشگیرانه و آینده‌نگر در سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی است. این بحران‌ها موجب شده تا رشته‌های مختلفی به این حوزه، ورود کرده و از زاویه دید خود راهکارهایی را برای مقابله با آن پیشنهاد کنند. مطالعات جرم‌شناسی نیز در این حوزه دارای ادبیات نسبتاً قوی است.

نظریه «جرم‌شناسی سبز»^۱ یکی از رویکردهای مطالعاتی نوین در جرم‌شناسی انتقادی است که به طور کلی، با مطالعه پیوند میان فعالیت‌های انسانی و آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از آن، تلاش می‌کند تا عواملی که موجب «جرایم زیست‌محیطی»^۲ می‌شود را شناسایی کرده و راهکارهایی برای پیشگیری از بروز این عوامل ارائه دهد. علاوه بر این، جرم‌شناسی سبز، قوانین کیفری موجود را برای حفاظت از محیط زیست و گونه‌های جانوری کافی نمی‌داند و خواستار توسعه جرم‌انگاری در این حوزه است (White: 2016). بر خلاف جرم‌شناسی سنتی که بر بزه‌دیدگان انسانی تمرکز دارد، جرم‌شناسی سبز می‌پذیرد که سایر موجودات زنده نیز ممکن است قربانی اعمال آسیب‌زننده انسان باشند (Lynch & Long, 2022). بنابراین، جرم‌شناسی سبز، شکاف میان دغدغه‌های جرم‌شناسی رایج (که بیشتر بر بزهکاری کارگران و جرایم خیابانی تمرکز دارد) و مسائل مربوط به آینده پایدار محیط زیست و حقوق بشر (حق بر محیط زیست سالم، پیشگیری از جرایم زیست‌محیطی و عدالت زیست‌محیطی) را پر می‌کند (White, 2016).

نظریه جرم‌شناسی سبز برای اولین بار توسط «مایکل لینچ»^۳ و در سال ۱۹۹۰ مطرح شد.^۴ وی در مقاله‌ای با عنوان «سبز کردن جرم‌شناسی»^۵، جرایم زیست‌محیطی را در مرکز توجه قرار می‌دهد و با نگاهی انتقادی جرایم و بی‌عدالتی‌های زیست‌محیطی را بررسی می‌کند (O'Brien & Yar, 2008). جرایم زیست‌محیطی، مفهوم گسترده‌ای است که علاوه بر آسیب‌های اقتصادی، حق بر محیط زیست سالم را نقض می‌کنند. نظریه پردازان این حوزه معتقدند که در جرایم زیست‌محیطی به دلیل آن که اغلب با آسیب‌های گسترده همراه است و گاه ممکن است، اعاده وضعیت به حالت سابق هرگز امکان‌پذیر نباشد؛ بنابراین بهترین راهکار برای مقابله با جرایم زیست‌محیطی، پیشگیری و اقدامات پیش‌دستانه است (Keramati Moez, 2024).

مرتکبان جرایم زیست‌محیطی، اغلب دارای انگیزه‌های مالی و موقعیت‌های اقتصادی و سیاسی هستند و معمولاً این جرایم در بستر شغلی محقق می‌شود. از آن جا که بزهکاران این جرایم، طبیعت در معنای موسع را بزه‌دیده قرار می‌دهند، به آن‌ها «بزهکاران یقه سبز»^۶ گفته شده و به تبع آن، به رویکرد جرم‌شناسانه‌ای که به مطالعه این جرایم می‌پردازد، «جرم‌شناسی سبز»^۷ و «جرم‌شناسی جرایم یقه سبزها»^۸ گفته می‌شود (Najafi Abranabadi, 2019). البته، کانون توجه جرم‌شناسی سبز، بیشتر بر روی آسیب‌های زیست‌محیطی^۹ است تا این که بر جرایم این حوزه تمرکز کنند (Nurse, 2017). بنابراین، دامنه مطالعاتی این نظریه بسیار وسیع و گسترده است و می‌تواند شامل هر نوع آسیب زیست‌محیطی شود.

1 - Green Criminology

2 - Environmental Crimes

3 - Micgael J. Lynch

۴ - لازم به ذکر است که برخی، ادوین ساترلند (Edvin Sutherland) را بنیان‌گذار جرم‌شناسی زیست‌محیطی (پیش از آن که جرم‌شناسی سبز به آن گفته شود) می‌دانند و معتقدند که ساترلند در سال ۱۹۴۰ در کتاب «جرایم یقه‌سفیدها» (White Collar Crimes) از جرایم زیست‌محیطی به عنوان شکلی از جرایم یقه‌سفیدان نام برده است (Gorji fard, 2016).

5 - Green the Criminology

6 - Green Collar Criminals

7 - Green Criminology

8 - Criminology of Green Collar Criminals

۹ - آسیب‌های زیست‌محیطی ناظر بر هر گونه رفتاری است که، چه به صورت مستقیم و چه به صورت غیرمستقیم، منجر به تخریب، اختلال یا کاهش کیفیت محیط زیست شود؛ فارغ از این که در نظام حقوقی جرم‌انگاری شده یا نشده باشد. اما، جرایم زیست‌محیطی شامل رفتارهایی می‌شود که به موجب نص قانون، مشمول عنوان مجرمانه خاصی شود. برای مثال در حقوق داخلی، قانون هوای پاک (۱۳۹۶) به جرم‌انگاری مصادیق آلودگی هوا پرداخته است. قانون حفاظت از خاک (۱۳۹۸) به جرم‌انگاری آلودگی و تخریب خاک اشاره می‌کند. قانون مدیریت پسماند (۱۳۸۲) دفع پسماند غیراصولی را جرم‌انگاری می‌کند. با وجود

یکی از موضوعات مهم در تحلیل‌های جرایم زیست‌محیطی، موضوع اقتصاد سیاسی^۱ است که بر دو حوزه تأکید دارد. در بخش اول، به بررسی نقش و فعالیت‌های دولت می‌پردازد که موجب تسهیل یا ایجاد شرایط مناسب برای تخریب و آسیب‌های زیست‌محیطی می‌شود. این مسائل مرتبط با سیاست‌گذاری عمومی و مداخله مستمر دولت‌ها در این موضوعات است. بخش دوم، به بررسی نقش تعیین‌کننده و کلیدی سرمایه‌داری در تولید و شیوه‌های آسیب‌زای آن در تعارض با محیط زیست اختصاص دارد (DeKeseredy & Dragiewicz, 2019). بنابراین، جرایم زیست‌محیطی به شکل فزاینده‌ای با ایدئولوژی سرمایه‌داری در ارتباط است. به همین دلیل، جرم‌شناسی سبز نگاهی بدبینانه نسبت به سرمایه‌داری، فرهنگ مصرف و تضادهای اجتماعی دارد که این نوع نگرش، نشان از صبغه انتقادی و مارکسیستی جرم‌شناسی سبز را دارد (Gorji fard, 2016).

شاخه‌های مختلف جرم‌شناسی سبز، طی سی سال گذشته، به سرعت در حال توسعه و تکامل بوده و مورد توجه جرم‌شناسان قرار گرفته است. از جمله این شاخه‌ها می‌توان به جرم‌شناسی تغییر اقلیم، جرم‌شناسی پیشگیرانه در قبال جرایم زیست‌محیطی، جرم‌شناسی گونه‌های جانوری، جرم‌شناسی حیات وحش و جرم‌شناسی جهان‌بوم اشاره کرد.^۲ جرم‌ها و آسیب‌های سبز شامل طیف گسترده‌ای از رفتارهای انسانی هستند که آسیب‌های زیست‌محیطی ایجاد می‌کنند و باعث اختلال در وضعیت طبیعی و عادی جهان طبیعت می‌شوند. این رفتارهای مخرب زیست‌محیطی می‌توانند شامل آلودگی هوا، آب، خاک، تخریب جنگل‌ها و انواع مختلفی از قاچاق حیوانات غیرقانونی باشند. همچنین، آسیب‌های دیگری مانند آزار حیوانات از جمله حیوانات خانگی، حیوانات وحشی و حیوانات آزمایشگاهی را در بر می‌گیرد. علاوه بر این، پژوهش‌های جرم‌شناسی سبز به آسیب‌هایی پرداخته است که با بی‌عدالتی غذایی و دستکاری ژنتیکی گیاهان یا حیوانات مرتبط هستند.

برخی از این رفتارها که با زندگی مدرن گره خورده‌اند، رفتارهای عادی و بهنجار در نظر گرفته می‌شوند که حتی برای ادامه زندگی در جامعه مدرن ضروری هستند. این رفتارها می‌تواند شامل بریدن درختان جنگل برای چوب، استخراج معادن و یا آلودگی اکوسیستم‌ها باشد. با وجود آن که، این نوع رفتارها در دنیای مدرن به صورت عادی درآمده‌اند، اما عادی بودن این رفتارها به این معنی نیست که بی‌ضرر هستند یا انتخاب‌های بهتری برای انجام این نوع آسیب‌های زیست‌محیطی وجود ندارد (Lynch & Long, 2022). جرم‌شناسی سبز نسبت به عادی جلوه دادن جرایم سبز موضع می‌گیرد و خواهان توجه نظام عدالت کیفری به این جرایم است. بنابراین، جرم‌شناسی سبز انواع مختلفی از آسیب‌های زیست‌محیطی را بررسی می‌کند که از جمله این آسیب‌ها می‌توان به سدسازی و پیامدهای زیست‌محیطی آن اشاره کرد.

توسعه و بهره‌برداری از نیروگاه‌های برق‌آبی و سدهای بزرگ اغلب با پیامدهای اجتماعی عمیق و گسترده‌ای همراه است که معمولاً به درستی شناسایی و ارزیابی نمی‌شوند. همین امر باعث شده که در بسیاری از موارد، نهادهای مسئول به طور جدی به تأثیرات منفی این پروژه‌ها بر زندگی جوامع محلی نپردازند. از سال ۱۹۷۰ به بعد آگاهی درباره اثرات منفی زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی سدها پدیدار شده است (Nori Najafi, Veysi, Khoshbakht & Mirzaeitalar Poshti, 2019). کمیسیون جهانی سدها (WCD)^۳ بیش از دو دهه پیش هشدار داده بود که ساخت سدهای بزرگ بدون توجه کافی به پیامدهای اجتماعی، موجب آسیب‌های گسترده‌ای از جمله آوارگی میلیون‌ها نفر، از دست رفتن معیشت، و تضعیف کیفیت زندگی شده است.

تصویب چنین قوانینی، اما ممکن است آسیب‌های زیست‌محیطی گسترده‌ای که ناشی از اتخاذ سیاست‌های توسعه‌ای دولت است؛ در لیست جرایم قرار نگیرد، مانند سیاست‌های انتقال آب در سال‌های اخیر یا برنامه‌های توسعه شهری که بدون ارزیابی اثرات زیست‌محیطی اجرا می‌شود.

1 - Political Economy

۲ - ن.ک. کرامتی معز، هادی. (۱۴۰۳). جرم‌شناسی (طرح مباحث نوین در دانش جرم‌شناسی). تهران: شهامی انتشار. صص. ۹۴-۱۰۴. بخشی از این کتاب، انواع شاخه‌های جرم‌شناسی سبز را مطرح کرده و عمده مباحث آن‌ها را مطرح می‌کند. وایت، راب. (۱۳۹۵). جرایم زیست‌محیطی فراملی: به سوی جرم‌شناسی جهان‌بوم. ترجمه حمیدرضا دانش‌ناری، تهران: نشر میزان.

3 - World Commission on Dams

همچنین، در اغلب موارد، جبران خسارت‌های وارده به بومیان ناکافی بوده و تلاش‌ها برای بازگرداندن شرایط زندگی این افراد با شکست مواجه می‌شود (Smith, 2024). فیلیپ فرناید از مؤسسه ملی تحقیقات آمازون در برزیل، یکی از جامع‌ترین مطالعات را درباره انتشار گازهای گلخانه‌ای از مخازن سدها انجام داده است. او در بررسی دو سد بالینا و توکوروی، نشان داد که این مخازن در سال‌های اولیه فعالیت خود میلیون‌ها تن دی‌اکسید کربن و متان منتشر کرده‌اند. یافته‌ها حاکی از آن است که سد توکوروی تأثیری ۶۰ درصد بیشتر از یک نیروگاه زغال‌سنگ و ۵۰ درصد بیشتر از یک نیروگاه گازسوز با همان میزان توان تولیدی برق، بر گرمایش زمین داشته، در حالی که اثر سد بالینا ۲۶ برابر یک نیروگاه زغال‌سنگ بوده است. این پژوهش تأکید می‌کند که برخلاف تصور عمومی، سدهای آبی نیز می‌توانند نقش قابل توجهی در تشدید تغییرات اقلیمی و آسیب‌های زیست‌محیطی بزرگ داشته باشند (Fearnside, 1995).

بدین ترتیب، این پژوهش بر آن است تا با استفاده از روش تحلیل محتوای کیفی، رمان «بعد از ابر» را در پرتو نظریه جرم‌شناسی سبز بررسی و ارزیابی نماید. پرسش اصلی پژوهش آن است که بازنمایی آسیب‌های زیست‌محیطی و پیامدهای منفی ساخت سد در این رمان، به عنوان یک رمان واقع‌گرا، به چه شکل است؟ رمان چه کمکی به درک مخاطب از مفهوم جرایم دولتی و شرکتی می‌نماید؟ گروه‌های قدرت و ثروت چه نقشی در وقوع و تشدید جرایم زیست‌محیطی ایفا می‌کنند؟ بدین منظور، ابتدا شرح مختصری از رمان بیان خواهد شد و سپس، روش‌شناسی تحقیق مطرح می‌شود. در ادامه یافته‌های پژوهش تحلیل شده و به دنبال آن نتیجه بحث بیان خواهد شد.

گذری کوتاه بر رمان

رمان «بعد از ابر» با سبک رئالیسم اجتماعی که عمده موضوع آن درباره پیامدهای ناشی از ساخت سد می‌باشد، توسط بابک زمانی نوشته شده است. رئالیسم در یک معنا، سبکی از داستان‌نویسی است که می‌کوشد تا جهان را به صورت عینی و واقعی بازنمایی کند (Sadeghi, 2022). این رمان، زندگی سخت و پر از چالش مردم استان ایلام که ایده کلی آن، از داستانی واقعی الهام گرفته را روایت می‌کند. رمان‌هایی با درون‌مایه دغدغه‌های زیست‌محیطی، به عنوان یک رسانه و محصول فرهنگی، می‌توانند جرایم محیط‌زیستی را بازتاب دهند و جامعه را نسبت به پیامدهای این جرایم و رفتارهای غیرمسئولانه شرکتی و دولتی در این زمینه آگاه سازند. از این حیث، مطالعه و تحلیل چنین رمان‌هایی با «جرم‌شناسی فرهنگی سبز»^۱ نیز ارتباط می‌یابد.

جرم‌شناسی فرهنگی سبز به عنوان یکی از شاخه‌های جدید جرم‌شناسی انتقادی معاصر، به دنبال غفلت سیستماتیک جرم‌شناسی فرهنگی و جرم‌شناسی سبز از برخی واقعیت‌های جرم‌شناختی و روش‌شناختی شکل گرفت. در واقع، جرم‌شناسی فرهنگی سبز مطالعات جرم‌شناسی فرهنگی و جرم‌شناسی سبز را به حوزه‌های جدیدی وارد می‌کند. جرم‌شناسی فرهنگی سبز معطوف شدن تمام توجه جرم‌شناسی فرهنگی به مطالعه فرهنگ و رسانه و نقش آن‌ها در بروز رفتارهای مجرمانه را موجب نادیده گرفته شدن جرم‌شناسی فرهنگی دولت می‌داند (Brisman & Sauss, 2017). یکی از مصادیق جرایم فرهنگی دولت، استفاده از ابزارهای رسانه‌ای برای تولید گفتمان‌های فرهنگی و معانی جدید از قبیل «ضرورت ملی» یا «راهبرد توسعه» در راستای پنهان‌سازی یا توجیه آسیب‌های زیست‌محیطی است که در مرکز توجه جرم‌شناسی فرهنگی سبز قرار می‌گیرد. جرم‌شناسی سبز نیز اهمیت توجه خود را به رفتارهای آسیب‌زننده زیست‌محیطی شرکت‌ها و دولت‌ها اختصاص داده و نسبت به بازتاب رسانه‌ای جرم غفلت ورزیده است. از این رو، با ادغام این دو دیدگاه، جرم‌شناسی فرهنگی سبز خلأهای پیشین را پر می‌کند (Rahimi nejad, 2019). به عبارت دیگر، جرم‌شناسی فرهنگی سبز، درک معانی و نحوه بازنمایی آسیب‌های زیست‌محیطی توسط رسانه و روایت‌های فرهنگی در تعامل با مفاهیم جرم‌شناسی سبز را

تحلیل می‌کند. بدین ترتیب، رمان «بعد/ز/بر» از حیث نحوه تولید مفهوم آسیب زیست‌محیطی و بازنمایی آن، از حیث جرم‌شناختی حائز اهمیت است.^۱

رمان «بعد/ز/بر»، داستان یک خانواده روستایی و اتفاقات ناگواری که برای آن‌ها رقم می‌خورد را به تصویر می‌کشد. این خانواده به دلیل مشکلات اقتصادی از شهر به روستای غرق‌آباد، روستای آباء و اجدادی خود باز می‌گردند. غرق‌آباد روستایی سرسبز، زیبا و دارای مناطق باستانی است و اکثر مردم آن به واسطه رودخانه پر آبی که از کنار آن می‌گذرد، به کشاورزی مشغول هستند. کم‌کم با صدای انفجارهای شدید، مردم روستا متوجه می‌شوند که شرکت سدسازی برای ساخت سد بر روی دریا رود، رودخانه غرق‌آباد، شروع به فعالیت کرده است.

یونس، پدر خانواده، از همان ابتدا با اجرای این پروژه مخالف است و از مردم روستا می‌خواهد تا در ساخت سد مشارکت نکنند، اما جوانان غرق‌آباد به خیال آن که کار درست و درمانی گیر آن‌ها آمده، برای گارگری، استخدام شرکت می‌شوند؛ بی‌خبر از آن که چه سرنوشت شومی در انتظار آن‌ها است. مدیران شرکت بارها وعده می‌دهند که ساخت سد موجب آبادانی و رونق اقتصادی روستا خواهد شد و هیچ خطری برای زمین‌های منطقه نخواهد داشت. مردم روستا نیز به پشتوانه اعتماد به آن‌ها و اشتغال در شغل جدید با شرکت سدسازی همکاری می‌کنند. اوج داستان زمانی شروع می‌شود که بعد از ساخت سد و بالا آمدن سطح آب، چند روستا تخلیه می‌شوند و حالا نوبت به تخلیه اجباری غرق‌آباد است. عده‌ای از اهالی روستا حاضر به ترک زادگاه و پشت کردن به خانه و کاشانه خود نمی‌شوند و از این‌جا، مدیران شرکت به روش‌های مختلفی در دل مردم غرق‌آباد تخم ترس و ناامنی می‌کارند تا به هر روشی که شده روستا را تخلیه کنند. مدیران شرکت سدسازی با اجیر کردن چند نفر، دستور کشتن سگ‌های روستا را می‌دهند و کار تا جایی پیش می‌رود که اسب مشک‌ی یونس را نیز می‌کشند تا با از بین بردن امنیت روانی، مردم راضی به خروج از روستا شوند. در نهایت، با کشته شدن یکی از اهالی و رسیدگی قضایی مشخص می‌شود که یکی از مدیران شرکت سدسازی در تمام این مدت به دنبال آثار تاریخی و زیرخاکی در این منطقه بوده است و انفجارهای متعدد نیز برای اکتشاف این آثار بوده است.^۲

مواد و روش‌ها

این مقاله از روش تحلیل محتوای کیفی برای ارزیابی داده‌های مرتبط با جرم‌شناسی انتقادی در رمان «بعد/ز/بر» بهره می‌برد. تحلیل محتوای کیفی روشی مناسب برای تحلیل داده‌های متنی در حجم گسترده و در یک بستر خاص است. با این روش، مهمترین طبقه‌ها و مقولات متن شناسایی می‌شود و کشف واقعیت پنهان متن را میسر می‌نماید. همچنین، به واسطه کدگذاری و مقوله‌بندی داده‌ها می‌توان نظریات مختلف را سنجید و صحت و سقم آن‌ها را ارزیابی نمود (Momenirad, 2013). با توجه به این که موفقیت تحلیل محتوای کیفی به انتخاب دقیق و هدفمند مقوله‌ها وابسته است و این مقوله‌ها باید با فرضیه‌ها و چارچوب نظری پژوهش

۱ - در ادبیات جهانی جرم‌شناسی فرهنگی سبز پژوهش‌های مشابهی در رابطه با بازنمایی آسیب‌های زیست‌محیطی در سینما یا ادبیات انجام شده است. برای مثال، ساوت، بریزمن و مک‌کلاناهان در پژوهشی با عنوان «جرم‌شناسی سبز، فرهنگ و سینما» به این مسئله می‌پردازند که چگونه سینما می‌تواند درک بهتر گفتمان‌های عمومی در مورد تغییرات و آسیب‌های زیست‌محیطی کمک نماید. آن‌ها نتیجه می‌گیرند که جرم‌شناسی باید توجه بیشتری به ابزارهای تولید فرهنگ؛ یعنی سینما و ادبیات در حوزه آسیب‌های زیست‌محیطی داشته باشد (McClanahan, Brisman & South, 2017). بریزمن در پژوهش دیگری با عنوان «داستان‌هایی از جرم، آسیب و حفاظت زیست‌محیطی: جرم‌شناسی روایی و جرم‌شناسی فرهنگی سبز» یک داستان را برای نشان دادن آسیب‌های زیست‌محیطی انتخاب می‌کند تا تمثیلی از این آسیب‌ها را در ادبیات بررسی نماید (Brisman, 2019).

۲ - از نظر قانونی، ارتکاب جرم مدیر شرکت در صورتی به عنوان جرم شخص حقوقی و به عبارتی، جرم شرکت محسوب می‌شود که به نام یا در راستای منافع شرکت باشد. در رمان «بعد/ز/بر»، حفاری و کاوش اشیاء تاریخی و باستانی توسط یکی از مدیران شرکت برای منافع شخصی صورت می‌گیرد و نمی‌توان آن را به عنوان جرم شرکتی تحلیل کرد. اما، از این جهت که ساخت سد منجر به زیر آب رفتن یک منطقه تاریخی و باستانی در رمان می‌شود، موضوع حائز اهمیت است؛ زیرا در ایران این پدیده امری ناشناخته نیست. برای نمونه، سد سیمره در استان ایلام و سد چپرآباد در استان آذربایجان غربی که مناطق باستانی مهمی در پشت این سدها وجود دارد، اما قسمتی از این مناطق زیر آب مدفون شده است.

هم‌راستا باشند (Nazari & Mokhtaripoor, 2009)، در این پژوهش نیز مقوله‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که با مفاهیم و دغدغه‌های نظریه‌های جرم‌شناسی سبز در پیوند مستقیم قرار دارند؛ به نحوی که هر مقوله، ناظر به یکی از ابعاد نظری این رویکردها در تبیین جرایم و آسیب‌های زیست‌محیطی است.

هدف این پژوهش، تبیین آموزه‌های جرم‌شناسی سبز و ارائه یک تحلیل جرم‌شناسانه مبتنی بر آسیب‌های اجتماعی ناشی از ساخت سدها است که رمان آن را به تصویر می‌کشد. بنابراین، این تحلیل به دنبال پاسخ به این سؤالات است: داده‌های متنی در چه حوزه‌هایی با نظریات جرم‌شناسی سبز تطابق دارد؟ پیامدهای سدسازی غیر اصولی چیست و چگونه زندگی بومیان را تحت تأثیر قرار می‌دهد؟ در ابتدا، به‌منظور درک کلی از رمان، متن آن چندین مرتبه خوانده شده است. سپس جملات معنادار استخراج شده و کدگذاری واحدهای معنا انجام شد. با استفاده از رویکرد استقرایی کدها مستقیماً از متن استخراج می‌شوند. در ادامه کدها بر اساس شباهت‌ها و تفاوت‌هایشان طبقه‌بندی شده و در نهایت، مقوله‌ها تنظیم خواهند شد.

بحث و نتایج

یافته‌های پژوهش ذیل سه مقوله سدسازی در پرتو جرم‌شناسی سبز، جرایم زیست‌محیطی قدرتمندان و بزه‌دیدگی بومیان و در نهایت، آسیب اجتماعی‌شناسی پروژه‌های سدسازی مطرح خواهد شد.

سدسازی در پرتو جرم‌شناسی سبز

یکی از ملموس‌ترین پیامدهای زیست‌محیطی ساخت سدها، غرق شدن جنگل‌ها، مرداب‌ها و زیستگاه‌های حیات‌وحش است. تاکنون حدود ۴۰۰ هزار کیلومتر مربع از اراضی جهان (تقریباً معادل یک چهارم مساحت کشور ایران) زیر آب مخازن سدها قرار گرفته است؛ مناطقی که اغلب جزء متنوع‌ترین و بارزترین زیست‌بوم‌های رودخانه‌ای بوده‌اند. بسیاری از گونه‌های گیاهی و جانوری قادر به ادامه حیات در محیط‌های جدید کنار مخازن سدها نیستند و ممکن است که برخی به کلی منقرض شوند. همچنین، سدها مسیرهای مهاجرت جانوران را قطع کرده و با جدا کردن جمعیت‌ها، خطر تنوع ژنتیکی پایین و ازدیاد نسل درون جمعیتی در یک حوزه ژنتیکی کوچک را افزایش می‌دهند. علاوه بر این، جابه‌جایی کشاورزان ساکن مناطق سدسازی، اغلب به تخریب بیشتر جنگل‌ها برای تأمین زمین کشاورزی یا مسکن منجر می‌شود.

با پیشرفت‌های علمی و پژوهش‌های نوین در سطح بین‌المللی، ابعاد تازه‌ای از تأثیرات زیست‌محیطی سدها آشکار شده که نشان می‌دهد برخی از مزایایی که در گذشته به عنوان دستاورد تلقی می‌شدند، در بلند مدت ممکن است نیازمند بازنگری باشند. از جمله این پیامدها می‌توان به تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از تجزیه مواد آلی در مخازن سدها و همچنین تشدید خسارات سیلاب در برخی شرایط اشاره کرد. نیروگاه برق‌آبی ممکن است که به گونه‌ای جدی آب رودخانه را آلوده کند و به سبب فساد خاک و گیاهان به زیر آب رفته در مخزن، گازهای گلخانه‌ای متصاعد کند. علاوه بر این، ساخت سدها موجب برهم خوردن رژیم طبیعی جریان آب و رسوب در رودخانه‌ها، تخریب زیست‌بوم‌های گیاهی و جانوری، افزایش خطر زمین‌لرزه و زمین‌لغزش، تبخیر بیشتر آب، بروز مشکلات بهداشتی، آثار منفی اقتصادی و اجتماعی و تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب می‌شود (Mazahri & Abdolmanafi, 2016).

از منظر جرم‌شناسی سبز این پیامدها به صورت سیستماتیک و به دلیل ارجحیت منافع اقتصادی نادیده گرفته می‌شوند.

یکی دیگر از پیامدهای زیست‌محیطی منفی ساخت سدها، تخریب اکوسیستم‌ها است. هنگام ساخت سد، بخش وسیعی از زمین‌ها و زیستگاه‌های طبیعی زیر آب می‌روند و اکوسیستم‌هایی که در طول سال‌ها در آن‌ها زندگی جریان داشته، نابود می‌شود. نابودی جنگل‌ها، مراتع، و مناطق حساس زیست‌محیطی باعث کاهش تنوع زیستی و از بین رفتن گونه‌های جانوری و گیاهی می‌شود.

در این فرآیند، گیاهان و جانوران بومی که به این اکوسیستم‌ها وابسته بودند، به دلیل تغییرات سریع و گسترده، در معرض نابودی قرار می‌گیرند. بنابراین، یکی از تبعات منفی ساخت سدهای برقی، جنگل‌زدایی، از بین رفتن پوشش گیاهی و نابودی زیست‌بوم جانوران است (White, 2016).

عدالت زیست محیطی یکی از مفاهیم مهم جرم‌شناسی سبز است که به اهمیت دسترسی برابر همه افراد به محیط زیست سالم تأکید دارد. در این دیدگاه، وقتی که گروهی از مردم، به ویژه جوامع بومی، از داشتن دسترسی به منابع طبیعی و محیط زیست سالم محروم می‌شوند، این امر به عنوان یک جرم زیست محیطی در نظر گرفته می‌شود (Gorji fard, 2016). گفتمان عدالت زیست محیطی در رأس مباحث خود، نابرابری در توزیع محیط زیست را قرار می‌دهد. بر این اساس، در بزه‌دیدگی زیست محیطی دو گروه در مقابل یکدیگر واقع می‌شوند؛ از یک طرف، گروه‌های قدرت از جمله شرکت‌ها و دولت‌ها قرار دارند و از طرف دیگر، گروه‌های نابرخوردار از جمله ساکنان بومی، اقلیت‌های قومی و ناتوانان جای می‌گیرند (White, 2016). بدین ترتیب، بومیان یکی از مهمترین گروه‌های آسیب‌پذیر در برابر جرایم زیست محیطی می‌باشند که به دلیل تقابل با گروه‌های قدرت در حاشیه قرار می‌گیرند.

ماده اول اعلامیه جهانی حقوق بشر بیان می‌کند که انسان‌ها حق دارند از آزادی، برابری و شرایط زندگی مناسب در محیطی برخوردار باشند که به آن‌ها امکان زندگی شاد و سالم را بدهد. این اصول از دیدگاه «حقوق بشر زیست محیطی» قابل بررسی است. حقوق بشر زیست محیطی به حقوقی اطلاق می‌شود که به حفاظت از محیط زیست مرتبط است و شامل حقوقی می‌شود که انسان‌ها به دلیل زندگی در یک محیط زیستی سالم، برای رشد و سلامت خود باید از آن‌ها بهره‌مند شوند (Mashhadi & Fahimi, 2016). در پروژه‌های سدسازی، نقض حقوق بشر در جوامع بومی و محلی به وضوح مشاهده می‌شود. این پروژه‌ها، که در ظاهر با هدف توسعه و بهره‌برداری از منابع آبی و تولید انرژی اجرا می‌شوند، اغلب حقوق انسانی مردم را زیر پا می‌گذارند. از دست دادن زمین‌های کشاورزی، خانه‌ها، و منابع آبی بومیان که نسل‌ها برای تأمین معیشت خود از آن‌ها استفاده کرده‌اند، تنها بخشی از این نقض‌هاست. بومیان و جوامع محلی به طور اجباری مجبور به ترک خانه‌های خود می‌شوند و این جابه‌جایی آن‌ها را از محیط زیست طبیعی خود جدا می‌کند و سبب از دست دادن هویت فرهنگی و اجتماعی آن‌ها می‌شود. علاوه بر این، عدم توجه به رفاه این جوامع پس از جابه‌جایی، مانند فقدان شغل، آموزش و زیرساخت‌های اجتماعی مناسب، شرایطی را ایجاد می‌کند که در آن حقوق ابتدایی انسان‌ها نقض می‌شود.^۱

در رمان «بعد/ز/بر»، سدسازی از سوی شرکت به عنوان پروژه‌ای با هدف آبادانی معرفی می‌شود، اما در حقیقت، منجر به تخریب محیط زیست، انفجار کوه‌ها، دفن گونه‌های گیاهی و اراضی کشاورزی می‌شود. جرم‌شناسی سبز این روند را در زمره «جرایم زیست محیطی» قرار می‌دهد. در این مورد، تخریب طبیعت نه امری سهل‌انگارانه و از روی اشتباه، بلکه نتیجه برنامه ریزی هدفمند در راستای منافع شرکت و بدون توجه به ارزش‌های اکولوژیک است. از منظر عدالت زیست محیطی، نابودی زیست‌بوم‌ها بدون توجه به حق جمعی انسان‌ها و دیگر گونه‌های زنده برای بهره‌مندی از یک محیط سالم، مصداق روشنی از بی‌عدالتی است. از دیدگاه حقوق بشر زیست محیطی نیز، حق بر محیط زیست سالم یک حق بنیادی بشر است که در قالب نسل سوم حقوق بشر معرفی می‌شود. تخریب منابع طبیعی در جریان این پروژه، مستقیماً با حق انسان‌ها برای داشتن آب، خاک، هوا و سرزمین سالم در تضاد است (جدول ۱).

۱ - در یک پژوهش علمی، قضاوت و ارزش‌گذاری یک‌سویه خلاف چارچوب‌های پژوهشی بی‌طرفانه است و استفاده از رویکرد مقایسه‌ای و بیان دیدگاه‌های منفی و مثبت، مانع از موضع‌گیری خاص می‌شود. از این منظر، علاوه بر تحلیل پیامدهای منفی سدسازی که موضوع اصلی نوشتار است، بیان پیامدهای مثبت آن نیز خالی از لطف نیست. تأمین آب (شرب، کشاورزی و صنعتی)، ارتقای امنیت آبی، مدیریت منابع آب، تولید انرژی، کنترل سیلاب، آمایش سرزمین و تغذیه سفره‌های آب زیر زمینی از فواید سدسازی می‌باشند (Abbasi, 2022) که باید با توجه به شرایط اقلیمی و زیست بوم ایران سنجیده شده و میان بد و بدتر گزینش صورت گیرد.

جدول ۱- مقوله سدسازی در پرتو جرم‌شناسی سبز

Table 1- Dam construction category in the light of green criminology

مقوله Category	کدگذاری Coding	داده معنایی Semantic data	شماره Number
سدسازی در پرتو جرم‌شناسی سبز (Dam construction in the light of green criminology)	پروژه‌های سدسازی، مراحل اولیه ساخت با تخریب محیط زیست همراه هستند.	سلیم: نه یونس؛ چه ویرانی؟ تازه آبادانی می‌آورد برای منطقه. کار می‌آورد برای جوان‌های غرق‌آباد و طولاب و جاهای دیگر. پدر با حالتی عصبی به سلیم نگاه کرد: غرق‌آباد خودش آباد هست. خوب نگاه کن. چشم که داری! ... آبادانی که با ویرانی آغاز نمی‌شود. نگاه کن با انفجار چه بر سر کوه‌ها آورده‌اند. این چه آبادانی است؟ (Salim: No, Yunus; what destruction? It will bring prosperity to the region. It will bring jobs to the youth of Gharqabad, Tulab, and other places. The father looked at Salim with a nervous expression: Gharqabad itself is prosperous. Look closely. You have eye! ... A prosperity that does not begin with destruction. Look at what they have brought to the mountains with the explosion. What kind of prosperity is this?)	1
سدسازی در پرتو جرم‌شناسی سبز (Dam construction projects are associated with environmental destruction in the early stages of construction)	یکی از آثار منفی ساخت سدها، زیر آب رفتن درختان و از بین رفتن زمین‌های کشاورزی بومیان است.	گاه و بی‌گاه هم، صدای انفجاری که برای از میان بردن کوه‌ها و صخره‌هایی که مانع احداث سد شده بود، خواب و آرامش اهالی غرق‌آباد و سایر مناطق را به هم می‌ریخت؛ انگار میدان جنگ بود. بی‌خبر، هر وقت دلشان می‌خواست، انفجار می‌زدند، همان‌طور که دشمن بی‌خبر بمباران می‌کند. (Every now and then, the sound of explosions to destroy the mountains and rocks that were blocking the construction of the dam would disrupt the sleep and peace of the residents of Gharqabad and other areas; it was as if it were a battlefield. Unknowingly, they would detonate whenever they wanted, just as the enemy bombs without warning)	2
سدسازی در پرتو جرم‌شناسی سبز (Dam construction in the light of green criminology)	یکی از آثار منفی ساخت سدها، زیر آب رفتن درختان و از بین رفتن زمین‌های کشاورزی بومیان است.	سلیم: سدسازی همین است دیگر. گرد و خاک دارد، انفجار دارد، سر و صدا دارد. پدر: بیخود کرده‌اند. تمام منطقه را به گند می‌کشند. ویرانش می‌کنند. (Salim: That's what building a dam is all about. There's dust, there's explosions, there's noise. Father: They've done it in vain. They're ruining the whole area. They're destroying it)	3
سدسازی در پرتو جرم‌شناسی سبز (Dam construction in the light of green criminology)	یکی از آثار منفی ساخت سدها، زیر آب رفتن درختان و از بین رفتن زمین‌های کشاورزی بومیان است.	طبق برآوردها و محاسبات ما، چیزی حدود ۳۲۰۰ میلیون متر مکعب آب در خود جای می‌دهد و علاوه بر تولید ۶۷۳ گیگاوات ساعت انرژی برق، موجب عمران و آبادانی منطقه و زمین‌های کشاورزی مجاور خواهد شد. یک دفعه پدر با صدای بلند گفت: آخر مرد حسابی! با آب‌گیری این سد عظیم شما، دیگر زمینی هم باقی می‌ماند که بخواهد آباد شود! (According to our estimates and calculations, it will hold about 3,200 million cubic meters of water and, in addition to producing 673 gigawatt hours of electricity, it will also contribute to the development and prosperity of the region and neighboring agricultural lands. Suddenly, the father said loudly: "oh man! With the water from this huge dam of yours, will there be any land left to be developed?)	4
سدسازی در پرتو جرم‌شناسی سبز (Dam construction in the light of green criminology)	یکی از آثار منفی ساخت سدها، زیر آب رفتن درختان و از بین رفتن زمین‌های کشاورزی بومیان است.	اداره کشاورزی گذاشتن پمپ آب در دریا رود و کشیدن انشعاب از آن برای زمین‌ها و باغ‌ها را قدغن کرده بود. تا قبل از آن که شرکت سدسازی خیمه‌اش را در منطقه برپا نکرده بود، چنین قانون مسخره‌ای سابقه نداشت. معلوم بود کار آن‌هاست و دستشان در یک کاسه است. این‌ها می‌گفتند سد که آب‌گیری شود، تمامی اراضی و باغات منطقه چند بلاد آن طرف‌تر، بی‌نیاز از آب می‌شود، اما حالا حتی نمی‌گذارند از خود دریا رود هم آب برای درخت‌هایمان ببریم. (The Department of Agriculture had banned the installation of water pumps in the Darya-Rud and the drawing of branches from it for fields and gardens. Such a ridiculous law had never been passed before the dam construction company had set up its tent in the area. It was clear that it was their work and that they were cooperating. They said that once the dam was filled, all the fields and gardens in the area a few villages away would no longer need water, but now they won't even let us take water from the Darya-Rud itself for our trees)	5

6 آمدند توی غرق آباد و در دل مردم وحشت انداختند که جمع کنید از این جا بروید وگرنه زیر آب می‌روید خودتان و خانه‌هایتان. می‌گفتند اگر دیر بجنبید، مثل مردم آتلانتیس، مایه عبرت آیندگان می‌شوید.

(They came to the flooded city and struck fear into the hearts of the people, telling them to gather and leave, or else you and your houses would be submerged. They said that if you move too late, you would become a lesson for future generations, like the people of Atlantis)

7 شاید آخرین باری بود که داشتم آن گیاهان، آن سنگ‌ها و آن درختان را می‌دیدم. شاید آخرین انسانی بودم که بر فلان سنگ دره پا می‌گذاشتم و فلان گیاه و گل و درخت آن را لمس می‌کردم. آن‌جا قرار بود بستر دریا شود.

(Maybe it was the last time I would see those plants, those rocks, and those trees. Maybe I was the last person to step on a rock in the valley and touch a plant, flower, or tree. That place was to become the seabed)

جرایم زیست‌محیطی قدرتمندان و بزه‌دیدگی بومیان

در دیدگاه‌های سنتی جرم‌شناسی، تنها شهروندان معمولی مرتکب جرم می‌شوند. در مقابل، حکومت وظیفه برقراری نظم و کنترل جامعه را بر عهده دارد و از این رو، حکومت یک نهاد قدسی و اسطوره‌ای به شمار می‌آید که حافظ زندگی اجتماعی است. اما، در جرم‌شناسی انتقادی اعتبار این دیدگاه که تنها طبقات فرودست جامعه مرتکب جرم می‌شوند، زیر سؤال می‌رود و از این رو، بررسی جرایم قدرتمندان به عنوان یکی از مسائل مهم و جدی وارد حوزه جرم‌شناسی می‌شود. بر این اساس، حکومت یکی از اصلی‌ترین گروه‌های قدرتی است که جرایم و رفتارهای آسیب‌زای آن مورد توجه جرم‌شناسان منتقد قرار می‌گیرد (White & Haines, 2010). به عبارت دیگر، به زعم جرم‌شناسان منتقد، نقش حکومت و ساختارهای قدرت در مطالعات جرم‌شناسی جریان غالب نادیده گرفته شده است. از این رو، جرم‌شناسی انتقادی در تحلیل وقوع جرایم به سهم ساختارها، نهادها و سیاست‌های حاکمیتی توجه داشته و با تبیین آن، مسؤلیت کفیری برای دولت‌ها و حکومت‌ها را به رسمیت می‌شناسد. به طور معمول، جرم، رفتاری است که به موجب قوانین برای آن مجازات مشخص شده باشد. بر اساس این تعریف ابتدایی، مفهومی تحت عنوان جرم حکومتی قابل شناسایی و تعقیب نمی‌باشد؛ زیرا در سیاهه قوانین، چنین عنوانی وجود ندارد. با این وجود، امروزه در مطالعات جرم‌شناختی این مفهوم نقش مهمی در تبیین مسؤلیت حکومت‌ها دارد (Gholami & Gholami, 2020). با وجود آن که قوانین مختلفی در نظام‌های حقوقی وجود دارد که جرایم خاصی را برای مقامات و مسئولان دولتی و حکومتی پیش‌بینی کرده‌اند، اما باید به این نکته توجه داشت که مفهوم جرم حکومتی از منظر جرم‌شناسی انتقادی مفهومی متفاوت با تعاریف حقوقی و قانونی دارد؛ زیرا جرم حکومتی در جرم‌شناسی انتقادی محصول عملکرد نهادهای و ارگان‌های قدرت در یک چارچوب سازمان‌یافته است، نه حاصل رفتارهای فردی و موردی کارکنان دولت. جرایم حکومتی^۱ به عنوان رفتارهایی سازمان‌مند که حکومت‌ها به واسطه آن حقوق شهروندان را نقض می‌کنند، شناخته می‌شوند. این جرایم اغلب در قالب نقض حقوق بشر، حق بر سلامت، امنیت، آزادی و جرایم محیط زیستی رخ می‌دهد (Shiri & Jafarpoor, 2022). جرایم حکومتی را می‌توان فراتر از این موارد، به حوزه سیاست‌گذاری‌های آسیب‌زا و سوء مدیریت‌های ساختاری نیز تسری داد. در واقع، می‌توان جرایم حکومتی را شناسایی کرد که با حمایت‌های قانونی همراه می‌شوند. جرایم حکومتی ممکن است به ظاهر مشروع و در چارچوب قوانین و مقررات قرار گیرد، اما در حقیقت، حقوق اساسی افراد را نقض نماید. بنابراین، در جرایم حکومتی باید معنای موسع‌تری از جرم را در نظر داشت و از بعد آسیب اجتماعی‌شناسی آن را بررسی نمود. قرائت‌های نوین در جرم‌شناسی با تأکید بر مفهوم جرم حکومتی، بر تعیین مسؤلیت برای حکومت و کارگزاران آن به عنوان مسببان ایجاد بسیاری از آسیب‌های اجتماعی باور دارند (Gholami & Gholami, 2020). در این بستر، بسیاری از آسیب‌های زیست‌محیطی در قالب همکاری شرکت‌های خصوصی با دولت محقق می‌شود؛ زیرا که سیاست‌های عمومی بر اساس حمایت از سرمایه‌داری شکل می‌گیرد.

جرم‌شناسی سبز، بر ضرورت بازنگری در تعریف «جرم» تأکید می‌کند و نشان می‌دهد که بسیاری از آسیب‌های زیست‌محیطی اگرچه ممکن است از نظر قانونی جرم تلقی نشوند، اما آثار مخربی بر افراد و جوامع دارند و باید به عنوان نقض حقوق بشر و آسیب اجتماعی در سیاهه جرایم به رسمیت شناخته شوند. بسیاری از جرم‌شناسان سبز معتقدند که اقدامات قانونی، اما زیان‌بار مانند آلودگی یا تخریب جنگل‌ها، اغلب از سوی نهادهای قدرتمند صورت می‌گیرد و باعث بی‌خانمان شدن، از بین رفتن معیشت و محرومیت از منابع حیاتی برای اقشار فقیر و به ویژه بومیان می‌شود. در واقع، این افراد اغلب قربانیان اصلی آسیب‌های زیست‌محیطی هستند، در حالی که نقش ناچیزی در ایجاد آن‌ها دارند (Potter, 2010). این دیدگاه نشان می‌دهد که جرم‌شناسی سبز از چارچوب‌های موجود در جرم‌شناسی جریان غالب در مواجهه با تعریف جرایم فراتر رفته و خواهان درک عمیق‌تری از روابط قدرت، بی‌عدالتی و آسیب اجتماعی در بستر بحران‌های محیط‌زیستی است.

پژوهش‌ها نشان می‌دهد که عمده جرایم زیست‌محیطی توسط دولت‌ها و شرکت‌ها ارتکاب می‌یابد. از آن جا که دولت‌ها خود مسؤل نظام جرم‌انگاری هستند، طبیعی است که رفتارهای مخرب خود را جرم تلقی نکنند. همچنین، در قبال جرایم زیست‌محیطی که شرکت‌های بزرگ مرتکب می‌شوند نیز، اغلب ضمانت‌اجراهای مدنی در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس، لابی‌گروه‌های قدرت - ثروت و رویکرد ابزارگرایی^۱ دولت در تعریف جرایم، موجب می‌شود تا رفتارهای آسیب‌زا گروه‌های منتقد، جرم‌انگاری نشود (Daneshnari, 2016). افکار عمومی نیز در این مسیر مؤثر هستند. با وجود این که اکثر آسیب‌های زیست‌محیطی توسط شرکت‌ها رخ می‌دهد، اما افکار عمومی نه تنها آن‌ها را به عنوان سازمان‌های منحرف و بزهکار نمی‌شناسد، بلکه به عنوان شهروندان قانون‌مند تصور می‌کند (White, 2016). در واقع، شرکت‌های تجاری به لحاظ قابلیت انطباق‌پذیری بالا با جامعه و نمایش چهره قانون‌مند از خود می‌توانند از جمله مجرمان خطرناک به شمار آیند که افکار عمومی حساسیت کمتری نسبت به جرایم آن‌ها نشان می‌دهد. عامل اصلی ارتکاب جرایم شرکتی را باید در خصوصیات خاص آن‌ها جست‌وجو کرد. شرکت به ثبت رسیده دارای شخصیت حقوقی مجزا از مدیران و سهامداران آن فرض می‌شود. بدین ترتیب، مدیران و سهامداران در برابر اعمال غیر قانونی که شرکت مرتکب می‌شود، مسؤل نخواهند بود. این قالب شرکت‌ها خود ماهیتی جرم‌آفرین ایجاد می‌کند. از طرف دیگر، جایگاه شرکت به عنوان شخص حقوقی و پیچیدگی‌های آن، احتمال محکومیت شرکت‌ها را کاهش می‌دهد و نوعی کیفرناپذیری در قبال رفتارهای غیر قانونی شرکتی را به وجود می‌آورد (White, 2015). به عبارت دیگر، وجود خلأهای قانونی موجب می‌شود تا شرکت‌هایی با فرهنگ جرم‌زا شکل بگیرد.

جرایم شرکتی در سایه نظام سرمایه‌داری اهمیتی دو چندان می‌یابد. مفهوم عدالت زیست‌محیطی توسط نظام سرمایه‌داری تولید و بازتولید می‌شود. همچنین، تسلط نظام سرمایه‌داری موجب می‌شود تا بزه‌دیدگی مردم بومی در قبال تخریب محیط زیست نادیده گرفته شود (Lynch, Stretesky & Long, 2018). برای مثال، پروژه‌های عظیمی مانند ساخت سدهایی که به منظور تولید برق، توسط ائتلاف قدرت (دولت و شرکت‌های بزرگ) اجرا می‌شوند، اغلب با تصاحب قهرآمیز زمین و منابع همراه هستند که منجر به بیرون راندن مردم از خانه‌های آن‌ها، تصرف زمین و آب و خصوصی‌سازی مناطق عمومی و اشتراکی می‌شود (Van Uhm & Zaitch, 2021). این ائتلاف قدرت زمینه را برای بزه‌دیدگی ساختاری بومیان فراهم می‌آورد. در این قالب، بزه‌دیدگی ساکنان روستایی که رمان «بعد از ابر» آن‌ها را به تصویر می‌کشد، محصول اقدامات شرکت سدسازی به صورت خاص نیست، بلکه نتیجه یک ساختار اقتصادی و سیاسی است که حقوق بومیان را در برابر منافع نظام سرمایه‌داری نادیده می‌انگارد. این تحلیل بیانگر آن است که بزه‌دیدگی در سطح خرد (بزه‌دیده جرم شرکت) با بزه‌دیدگی در سطح کلان (بزه‌دیدگی ساختاری) در تعامل است. جرم‌شناسی سبز به طور کلی، نظام سرمایه‌داری را نظام مخربی می‌داند که موجب نادیده گرفته شدن محیط زیست می‌شود (DeKeseredy & Dragiewicz, 2019). زیرا در نظام سرمایه‌داری سود اقتصادی و انباشت سرمایه، سیاست اصلی پیشبرد جامعه است.

یکی از نواقص شایع در پروژه‌های سدسازی، بی‌تعهدی مسئولان دولتی نسبت به موضوع اسکان مجدد افراد جابه‌جا شده است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که بسیاری از روستائینی که با ساخت سد به اجبار جابه‌جا شده‌اند، به نقش مسئولان دولتی در از دست رفتن سرمایه و دارایی خود تأکید دارند. ساختار نهادی این پروژه‌ها، در نحوه مواجهه با مسئله اسکان و دیگر موضوعات مرتبط با توسعه منطقه‌ای، که برای جمعیت‌های آسیب‌دیده اهمیت دارد، تأثیرات جدی بر جای می‌گذارد. در این میان، سیاست رایج، عدم تصمیم‌گیری مشخص و رها کردن مسئله اسکان مجدد به حال خود بوده است؛ به گونه‌ای که فرآیند جابه‌جایی‌ها اغلب تحت فشار، بدون رضایت و مشارکت ساکنان، و در مراحل نهایی اجرا شده است. این وضعیت، بیانگر عدم وجود برنامه‌ریزی منسجم و ساختارمند برای اسکان مجدد در این پروژه‌ها است (Mansouri Moghadam, Fayaz, Nosrati & Anvari, 2021). در رمان «بعد از/ابر» نیز وضعیت مشابهی در خصوص جابه‌جایی اهالی روستای غرق‌آباد وجود دارد. مردم روستا تحت فشار اقدامات شرکت سدسازی و بدون رضایت مجبور به ترک خانه خود می‌شوند.

در رمان «بعد از/ابر» یکی از موضوعات مورد توجه نویسنده، عدم مسئولیت‌پذیری شرکت‌ها و دولت است. در این رمان، آسیب‌های جبران‌ناپذیری که بر محیط طبیعی و ساکنان وارد می‌شود، عملاً بدون پاسخ می‌ماند و هیچ نهادی پیگیر مسئولیت اقدامات مخرب شرکت‌ها نیست. جرایم ارتكابی شرکت نشان دهنده فرهنگ جرم‌زای حاکم بر سازمان‌های اقتصادی نظام سرمایه‌داری است؛ فرهنگی که در آن، تخریب محیط زیست و بی‌اعتنایی به زندگی مردم، بخشی از استراتژی اقتصادی و الزامات سودآوری تلقی می‌شود. بدین ترتیب، هدف اصلی شرکت به حداکثر رساندن سود است، ولو آن که به قیمت جان انسان‌ها و نابودی محیط زیست تمام شود. از سوی دیگر، نقش دولت نیز قابل تأمل است. نهادهای دولتی که باید مدافع حقوق شهروندان و حمایت از حقوق بومیان باشند، در عمل منفعلانه نظاره‌گر تخلفات هستند یا مستقیماً، سیاست‌های حمایت‌گرانه از شرکت‌ها اتخاذ می‌کنند. این همراهی ضمنی یا آشکار، سبب تثبیت ساختارهای نابرابری و بزه‌دیدگی زیست‌محیطی می‌شود (جدول ۲).

جدول ۲- مقوله جرایم زیست‌محیطی قدرتمندان و بزه‌دیدگی بومیان

Table 2 - Category of environmental crimes of the powerful and victimization of indigenous people

شماره	داده معنایی	کدگذاری	مقوله
Number	Semantic data	Coding	Category
1	پدر گفت: بس است باقرا! رعایت کن. این بی‌شرف‌ها معلوم نیست تا کی آب را بر روی مان قطع کنند. نگاهی به پدر انداختم و گفتم: این‌ها که گفتند روزهای خوبی در راه است! یادت نیست؟ خودشان گفتند؛ توی چشم‌هایمان زل زدند و گفتند روزهای خوبی در راه است. پدر گفت: یادم هست. یادم هست، خوب هم یادم هست. گفتند «روزهای خوب»، اما نگفتند روزهای خوب برای چه کسی! آری؛ روزهای خوب؛ اما نه برای ما، که برای خودشان. دروغ هم نگفته‌اند.	شرکت‌ها از پاسخگویی در قبال رفتارهای غیرقانونی خود سرباز می‌زنند و نسبت به آن‌ها مسئولیت‌پذیر نیستند.	جرایم زیست‌محیطی قدرتمندان و بزه‌دیدگی بومیان (Environmental crimes of the powerful and victimization of indigenous people)
2	مادر گفت: ... درخت زیتون دیه دارد. پول دیه درختان زیتونت را بگیر، راحت می‌توانیم برویم از این خراب شده. پدر با پوزخندی گفت: این‌ها در روز روشن آدم می‌کشند و راست‌راست توی خیابان راه می‌روند، آن وقت تو انتظار داری پول دیه زیتون‌های مرا بدهند؟! (The mother said: ... The olive tree has an atonement. Take the atonement for your olive trees, we can easily leave now that it's ruined. The father said with a grin: "These people kill people in broad daylight and walk right down the street, so you expect them to pay atonement for my olives?")	(Companies refuse to be held accountable for their illegal behavior and are not responsible for it)	

- 3 آخر سر هم وقتی انفجار زده بودند، سنگ عظیمی از بالای کوه بر روی سرش فرو ریخته و لهش کرده بود. بیچاره تا یکی دو روز جنازه‌اش را پیدا نکردند، بعد هم که جنازه‌اش را پیدا کردند و معلوم شد که به خاطر انفجار شرکت سدسازی آن بلا سرش آمده، این بی‌شرف‌ها زیر بار نرفتند و این را بهانه کردند که ما اخطار داده‌ایم قبل از انفجار، به ما ربطی ندارد؛ آخر سر هم خون کریم‌کره پامال شد.
- (In the end, when they had exploded, a huge rock fell on his head from the top of the mountain and crushed him. The poor thing didn't find his body for a day or two, and then when they did find his body and it turned out that it was because of the explosion of the dam construction company that he had suffered, these dishonest people didn't take the blame and made the excuse that we had warned him before the explosion, it had nothing to do with us; in the end, the blood of the KarimKore people was trampled)
- 4 پدر: غلط کرده‌اند. این‌ها به خیالت به فکر مردم‌اند؟ این‌ها را اگر بگذاری رگ مردم را تیغ می‌زنند و خون‌شان را در شیشه می‌کنند و می‌فروشند. چه می‌گویی تو؟ ساده‌ای! چقدر زود فراموش‌شان می‌شود همه چیز... اصلاً چه کسی اجازه را به آن‌ها داده است؟ سلیم: این‌ها که اجازه نمی‌خواهند بونس. هر جا که دلشان بخواهد می‌روند و هر کار هم بخواهند می‌کنند.
- (Father: They made a mistake. Do you think these people care about people? If you let them, they will cut people's veins and put their blood in bottles and sell it. What do you say? You're simple! How quickly you forget everything... Who gave them permission anyway? Salim: They don't ask for permission, Yunus. They can go wherever they want and do whatever they want)
- 5 کم‌کم نامه‌های تخلیه خانه‌های شهرک به دست اهالی غرق‌آباد هم رسید. خیلی‌ها بی‌حرف و کاملاً تسلیم شده، بابت زمین‌ها و خانه‌هاشان، بهایی اندک می‌گرفتند و راهی هر کجا می‌شدند که جاده می‌رفت. بی‌مقصد و بی‌مأوا، راهی ناکجاآباد می‌شدند.
- (Gradually, letters to evacuate the town's houses also reached the residents of Gharqabad. Many, speechless and completely surrendered, took a small price for their land and houses and set off wherever the road led. Without a destination or a destination, they set off for nowhere)
- 6 همان موقع که شرکت سدسازی حکم تخلیه خانه‌های آن‌جا را گرفته بود و یکی‌یکی به خانواده‌ها نامه می‌داد که آن‌جا را ترک کنند؛ کم‌کم سگ‌کشی در آن‌جا بالا گرفت. هر شب سگ‌های زبان‌بسته را یکی یکی با اسلحه می‌کشتند... برای آن‌که امنیت از آن‌جا برود و اگر کسی مثل پدرت به ماندن در آن‌جا اصرار و پافشاری کرد، دیگر امنیتی نداشته باشد که بخواهد در آن‌جا بماند.
- (At the same time that the dam construction company had ordered the evacuation of the houses there and was writing letters to the families one by one to leave, the killing of dogs there gradually increased. Every night, the tongue tied dogs were killed one by one with guns... so that security would leave there and if someone like your father insisted on staying there, there would be no longer any security to stay there)
- 7 در دادگاه مشخص شد که پرویز و منوچهری (مهندس شرکت) پیش از آن هم زیرخاکی‌های بسیاری از غرق‌آباد و چشمه‌شیرین و چشمه‌شور و باقی مناطق به غارت برده بودند. دلیل آن همه انفجارهای بی‌مورد مگر چیزی غیر از آن می‌توانست باشد؟
- (It was revealed in court that Parviz and Manouchehri (the company's engineer) had previously relic many underground mines in Gharqabad, Cheshme Shirin, Cheshme Shoor, and other areas. Could there have been anything else to the reason for all those unnecessary explosions?)

جرایم در حالی که بومیان نیاز به حمایت دولتی در این شرایط دارند، اما شرکت‌های قدرتمند از حمایت‌های دولتی بیشتری برخوردار است.

(While indigenous people need government support in these circumstances, powerful companies enjoy greater government support)

جرایم شرکت‌هایی با فرهنگ سازمانی جرم‌زا و اصلت سود، دست به هر اقدامی برای کسب سود می‌زنند.

(Companies with a criminal organizational culture and a profit motive will do anything to make a profit)

بزه‌دیدگی بومیان (Environmental crimes of the powerful and victimization of indigenous people)

آسیب اجتماعی‌شناسی پروژه‌های سدسازی

زمینولوژی^۱ به عنوان یک شاخه نوظهور و میان‌رشته‌ای در علوم اجتماعی و جرم‌شناسی انتقادی به جای مفهوم جرم به مفهوم آسیب تأکید دارد (Keramati Moez, 2024). در جرم‌شناسی سبز نیز، مفهوم آسیب در کانون توجه نظریه‌پردازان قرار می‌گیرد؛ زیرا که این مفهوم تنها به معنای نقض قوانین رسمی نیست و آسیب‌هایی را نیز در بر می‌گیرد که از نظر اجتماعی زیان‌بار هستند، حتی اگر قانون آن‌ها را جرم تلقی نکند. دلیل ایجاد این نگرش آن است که قوانین توسط دولت و تحت تأثیر گروه‌های فشار و شرکت‌های قدرتمند وضع می‌شوند و بدین ترتیب، ممکن است این قوانین در راستای منافع خود آن‌ها باشد و از آسیب‌های زیست‌محیطی که مقابله با آن، منافع دولت و شرکت‌ها را با خطر مواجه می‌سازد، چشم‌پوشی کنند (White, 2019). بنابراین، جرم‌شناسی سبز ایراد ضرر به محیط زیست را ملاک تشخیص جرایم زیست‌محیطی قلمداد می‌کند، نه ارتکاب عملی که از لحاظ قانونی جرم تلقی می‌شود (Daneshnari, 2018). در واقع، رویکرد زمینولوژی و جرم‌شناسی سبز مرز بین قانونی بودن و عادلانه بودن را به چالش می‌کشد و در پی شناسایی آسیب‌های مختلفی می‌باشند که در گفتمان رسمی نظام قانون‌گذاری نادیده گرفته می‌شود.

یکی از دغدغه‌های جرم‌شناسی سبز این است که شناسایی و پاسخ‌دهی به جرایم زیست‌محیطی با موانع اساسی روبه‌روست؛ از جمله دشواری در اثبات آسیب، پیامدهای بلندمدت، بی‌تفاوتی جامعه به این جرایم که معمولاً استاندارد و معمول تلقی می‌شوند؛ حتی اگر این جرایم به دادگاه برسند، ممکن است با استدلال‌های فنی، آثار جرم ناچیز جلوه داده شود و مجازات اعمال نگردد. بنابراین، اجرای عدالت زیست‌محیطی در مواردی که منافع کوتاه مدت سیاسی و اقتصادی غلبه دارد، بسیار دشوار است (South, 2017). عدالت زیست‌محیطی در جوامع سرمایه‌داری به شدت تحت نفوذ گروه‌های فشار و لابی قدرتمندان است. از این رو، عدالت زیست‌محیطی به طور فزاینده‌ای تبعیض‌آمیز می‌باشد؛ به این معنا که اجرای قوانین و پاسخگویی به نقض آن‌ها در این حوزه، اغلب متوجه گروه‌های فاقد قدرت اقتصادی و سیاسی است، با این که آسیب‌های زیست‌محیطی کلان توسط گروه‌های قدرت و ثروت ایجاد می‌شود.

فارغ از آسیب‌های زیست‌محیطی، ممکن است پروژه‌های سدسازی تبعات اقتصادی منفی نیز به دنبال داشته باشند. از جمله آسیب‌ها و تبعات اقتصادی این پروژه‌ها می‌توان به کاهش اشتغال و درآمد روستاییان اشاره کرد. پیامدهای اقتصادی به دلیل عواملی مانند از دست دادن زمین، عدم استفاده از نیروی کار بومی در پروژه‌های مربوط به سد، ناامنی شغلی، از بین رفتن اقتصاد روستایی، افزایش بیکاری، وابستگی اقتصادی به یک بخش خاص (که بیشتر به مردان وابسته است)، افزایش فقر، کاهش توان جذب در اقتصاد شهری، عدم تطابق درآمد با هزینه‌های زندگی، تمایل به کارهای با درآمد ناپایدار و عدم تناسب فضای جدید زندگی با شیوه‌های معیشتی کشاورزی و دامداری ایجاد می‌شود (Mansouri Moghadam et al., 2021). بدین ترتیب، ساخت سد نه تنها ممکن است موجب آبادانی برای جوامع بومی نشود، بلکه ممکن است به بی‌ثباتی اقتصادی و فقر بومیان منطقه دامن بزند. رمان «بعد از/بر» نیز به این موضوع توجه دارد و نشان می‌دهد که چگونه ساخت سد موجب از بین رفتن تدریجی اقتصاد کشاورزی شده و در نهایت، به دلیل بیکاری منجر به کوچ اجباری برخی از مردم روستا به شهر می‌شود.

بنابراین، ساخت سدها علاوه بر آسیب‌های زیست‌محیطی، زندگی بومیان را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. اجتماعاتی که در پایین دست سدها زندگی می‌کنند و به نوعی زندگی آن‌ها وابسته به جریان آب رودخانه است، تحت تأثیر مستقیم سد قرار می‌گیرند. در برخی موارد، این تأثیرات منجر به جابه‌جایی و اسکان اجباری ساکنان روستاها می‌شود. پروژه‌هایی که به جابه‌جایی و اسکان مجدد مردم منجر می‌شوند، معمولاً تأثیرات منفی و طاق‌فرسایی بر این جمعیت‌ها می‌گذارند. مطالعات نشان می‌دهد که افراد جابه‌جا شده به ندرت قادر هستند به استانداردهای زندگی قبلی خود باز گردند و اغلب با شرایطی بسیار بدتر از قبل مواجه می‌شوند (Mathur, 2006). در واقع، ساکنان محلی که تحت تأثیر این پروژه‌ها قرار گرفته‌اند، از آن چه که «بهای پیشرفت یا توسعه» خوانده می‌شود،

رنج می‌برند (Mansouri Moghadam et al., 2021). به عبارت دیگر، بومیان بهای توسعه‌ای را می‌پردازند که ذی‌نفع مستقیم آن نیستند. آن‌ها قربانی سیاست‌های توسعه و آبادانی بر مبنای گفت‌وگوهای منافع ملی می‌شوند که به نوعی بی‌عدالتی ساختاری را بازتولید می‌کند. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، رمان «بعد از ابر» یک نمونه عالی برای تحلیل در بستر جرم‌شناسی فرهنگی سبز است. این رمان به عنوان یک «محصول فرهنگی» و یک رسانه، به شکلی انتقادی به بازنمایی انواع آسیب‌های سدسازی می‌پردازد. «بعد از ابر» گفت‌وگوهای مسلط «آبادانی و توسعه» را در تقابل با اثرات مخرب پروژه‌های بزرگی مانند ساخت سد به چالش می‌کشد. رمان تلاش می‌کند تا لایه‌های پنهانی اثرات ساخت یک سد بر زندگی بومیانی را به تصویر بکشد که در برابر گفت‌وگوهای آبادانی و ائتلاف گروه‌های قدرت و ثروت، صدای آن‌ها به جایی نمی‌رسد.

علاوه بر این موارد، ساخت سدها می‌تواند منجر به غرق شدن و مدفون شدن آثار تاریخی و اماکن باستانی زیر آب شود، زیرا مخازن سدها مناطقی وسیع را پوشش می‌دهند که ممکن است شامل سایت‌های باستان‌شناسی و میراث فرهنگی باشد (Nori Najafi et al., 2019). این امر تهدیدی جدی برای حفاظت از این آثار به شمار می‌رود. این مسئله در رمان بازتاب یافته و غرق شدن یک منطقه باستانی در روستا را به عنوان یکی دیگر از آسیب‌های ساخت سد غیر اصولی، روایت شده است. در رمان «بعد از ابر»، آسیب‌های اجتماعی در اشکال مختلفی ظاهر می‌شوند. پروژه‌های سدسازی در این رمان، فقط به تخریب محیط زیست محدود نمی‌شود؛ بلکه چهره‌های روشن از یک آسیب اجتماعی گسترده را هم به تصویر می‌کشد. زندگی مردم محلی، که سال‌ها با سخت‌کوشی، زمین و باغ خود را آباد کرده بودند، زیر آب رفته و حاصل عمر آن‌ها بر باد می‌رود. اشتغال‌هایی که وعده داده شده بود، کوتاه مدت، بی‌ثبات و تحقیرآمیز بوده و آینده جوانان این مناطق را با چالش مواجه می‌کند. وعده‌های شغل و گفت‌وگوهای توسعه خیلی زود جای خود را به بیکاری، فقر، مهاجرت اجباری و فروپاشی خانواده‌ها می‌دهد. شرکت‌ها، نه تنها مسئولیتی در قبال این ویرانی اجتماعی نمی‌پذیرند، بلکه حقوق اولیه کارگران را هم رعایت نمی‌کنند. در چنین فضایی، ساخت سد، چرخه‌ای از بی‌ثباتی اقتصادی، بی‌اعتمادی اجتماعی و قربانی شدن انسان‌ها را ایجاد می‌کند. در این چرخه، سود شرکت‌ها بر حق داشتن محیط زیست سالم و کرامت انسان‌ها اولویت می‌یابد (جدول ۳).

جدول ۳ - مقوله آسیب اجتماعی‌شناسی پروژه‌های سدسازی

Table 3 - Sociological damage category of dam construction projects

مقوله Category	کدگذاری Coding	داده معنایی Semantic data	شماره Number
آسیب اجتماعی‌شناسی پروژه‌های سدسازی (Sociological damage of dam projects)	فقر و مهاجرت اجباری، از جمله مهمترین آسیب‌های موجود در رمان می‌باشند. (Poverty and forced migration are among the most important problems in the novel)	از خانه قادر تا خانه یدالله زیر آب رفته است. آب تا حیاط خانه علوی آمده است. اهالی شانس آوردند که زود از آن جا رفتند، وگرنه الان باید غواص می‌فرستادیم زیر آب پیدایشان کنند. (The water has gone from Qader's house to Yadollah's house. The water has reached the yard of Alavi's house. The residents were lucky that they left early, otherwise we would have had to send a diver to find them underwater by now)	1
		اول مشغولتان می‌کنند به چند روز عملگی و چندرغازی که کف دستتان می‌گذارند، بعد باید خانه و کاشانه‌تان را جا بگذارید و بروید که زیر آب نمانید. تو نمی‌دانی چیست این سد؛ مار در آستین پرورش دادن است. نگاه کن این دو سال چه گهی به منطقه زده‌اند، همه جا را به لجن کشیده‌اند. (First they make you busy with a few days of operations and a few tricks that they give you, then you have to leave your house and your home and go so you don't get flooded. You don't know what this dam is. Look at what they've done to the region in the last two years, they've dragged the whole place into the mud)	2

- 3
 اقلاً برای شش هفت سال دیگر نیاز به نیرو دارد؛ بیشتر جوان‌هایتان می‌توانند در آن‌جا شاغل شوند... بعدش چه کنند؟ چند سال بیایند برایتان سگ‌دو بزنند، چندغاز کف دستشان بگذارید و بعد بروید؟ از زندگی و زمین‌ها و باغ‌هاشان، از خانه و کاشانه‌شان دست بکشند برای چند سال عملگی؟
- (It needs manpower for at least another six or seven years; most of your young people can get jobs there... What will they do after that? How many years will they come to work for you, how many years will you give them a few money, and then go? How many years will they give up their lives, their lands, their gardens, their homes, and their homes to work as laborers?)
- 4
 مردم گرسنه‌اند؛ آن‌قدر که به خاطر همان چند پاپاسی حاضرند سگ خودشان را بکشند و برونند لاشه آن را تحویل بدهند تا خودشان از گرسنگی تلف نشوند. چه کنند؟ مگر چاره‌ای هم مانده برای مردم؟
- (People are hungry; so much so that they are willing to kill a dog and hand it over just for a few pittance so they don't starve to death. What should they do? Is there any other choice left for the people?)
- 5
 همه اهالی بندگان خدا صبح تا غروب عرق می‌ریختند و جان می‌کندند تا زمین و باغشان آباد شود... قادر و یدالله شکم‌های خودشان را صابون زدند و برای مردم بیچاره نقشه کشیدند که زمین‌هایشان را بزخر کنند و یک شبه پولدار شوند. خیال‌شان خام بود. فکر می‌کردند به همین سادگی‌هاست. برای هر کس لالایی بخوانی که خوابش ببرد، برای گرگ‌ها نمی‌توانی. شرکت سدسازی خیلی گرگ‌تر از آن‌ها بود.
- شرکت سدسازی تف هم کف دستشان نینداخت. حتی به اندازه نصف همان پولی که زمین‌ها و باغ‌ها را از اهالی خریده بودند را به آن‌ها نداد.
- (All the people, the God's servants, were sweating and working hard from morning to evening to develop their land and gardens... Qader and Yadollah hatched a plan for the poor people to steal their lands and become rich overnight. Their imagination was naive. They thought it was that simple. The dam construction company was much more cunning than them. The dam construction company did not even give them half the money they had bought the lands and gardens from the people)
- 6
 به دلیل آن که شرکت سدسازی حقوق خیلی از کارگرها را ماه‌ها پرداخت نکرده بود، بیشتر جوان‌هایی که سال‌ها آن‌جا کار کرده بودند، از شرکت بیرون آمده بودند. بماند که چه بلایی بر سرشان آمد بیچارگان. بیشترشان به هوای این که شغل و درآمد مناسبی دارند و می‌توانند تشکیل خانواده بدهند، زن گرفته بودند و خیلی‌شان هم یکی دو تا بچه روی دستشان مانده بود. حالا نه کار داشتند و نه نان برای خوردن.
- (Because the dam construction company had not paid the salaries of many workers for months, most of the young people who had worked there for years had left the company. What happened to the poor people? Most of them had married, hoping that they would have a decent job and income and be able to start a family, and many of them had one or two children left behind. Now they had no work and no bread to eat)
- 7
 آخر سر مثل خانه‌هایی که یک شبه در طولاب ساخته شد، یک روز شرکت سدسازی با بولدوزر همه‌شان را ویران می‌کند.
- (In the end, like the houses built overnight in Tulab, one day the dam construction company will destroy them all with a bulldozer)

آسیب‌های اقتصادی شامل خرید زمین‌های مردم به قیمت پایین، پرداخت حقوق کارگران، بیکاری و از دست دادن سرمایه بومیان می‌باشد.

(Economic damages include the purchase of people's land at low prices, non-payment of workers' salaries, unemployment, and loss of indigenous capital)

نتیجه‌گیری

اگرچه ساخت سدها همواره با تأکید بر مزایای اقتصادی، تولید انرژی، مدیریت منابع آبی و توسعه کشاورزی توجیه می‌شود، اما در بسیاری از موارد، آثار و پیامدهای اجتماعی آن نادیده گرفته می‌شود. جابه‌جایی اجباری جوامع محلی، از بین رفتن معیشت سنتی، تضعیف ساختارهای فرهنگی و اجتماعی، و نقض حقوق اقلیت‌ها و بومیان از جمله آسیب‌هایی است که در سایه نگاه فنی و توسعه‌محور به این پروژه‌ها پنهان می‌ماند. این در حالی است که توجه به ابعاد اجتماعی ساخت سدها می‌تواند درک جامع‌تری از پیامدهای این پروژه‌ها فراهم کند و زمینه‌ساز سیاست‌گذاری‌های عادلانه‌تر در حوزه توسعه و محیط زیست باشد.

یکی از چالش‌های اساسی بشر در قرن اخیر، مدیریت اصولی و پایدار منابع طبیعی و به طور ویژه، منابع آب است. رویکرد متداول در مدیریت این منابع، ساخت سد با اهدافی مانند تأمین آب، تولید انرژی برق‌آبی و مهار سیلاب بوده است. با این حال، مطالعات جدید نشان داده‌اند که تجمع آب در مخازن سدها تأثیرات قابل توجهی بر اکوسیستم‌ها و تنوع زیستی دارد که نمی‌توان آن‌ها را نادیده گرفت. بنابراین، سرمایه‌گذاری در روش‌های نوین حفاظت از محیط‌زیست ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. همچنین در طراحی و اجرای پروژه‌های سدسازی آینده، توجه به اصول توسعه پایدار باید به‌عنوان یک الزام اساسی در نظر گرفته شود.

در نظام سرمایه‌داری معاصر، روابط تنگاتنگ میان شرکت‌های بزرگ و دولت‌ها زمینه‌ساز شکل‌گیری چرخه‌ای از جرایم زیست‌محیطی شده است که در آن منافع اقتصادی سرمایه‌داران بر حقوق انسانی و محیط زیست ارجحیت می‌یابد. این ساختار قدرت، شرکت‌ها را قادر می‌سازد تا پروژه‌هایی چون ساخت سدهای بزرگ را با حمایت و مجوزهای دولتی اجرا کنند؛ پروژه‌هایی که در ظاهر با اهدافی چون تأمین انرژی، توسعه اقتصادی و کنترل منابع طبیعی توجیه می‌شوند، اما در عمل پیامدهای ویرانگری برای طبیعت و جوامع انسانی، به ویژه بومیان، به همراه دارند. رمان «بعد از ابر» به شیوه‌ای انتقادی، به دنبال آشکارسازی جنبه‌های پنهان جرایم دولتی و شرکتی در پروژه‌های بزرگی است که با هدف آبادانی و توسعه کشور اجرا می‌شوند. این رمان به درک بهتر مخاطب از مفهوم جرایم دولتی و شرکتی در مفهوم انتقادی آن کمک می‌کند؛ به این معنا که نگاه مخاطب را معطوف به آسیب‌هایی می‌کند که در گفتمان رسمی و مسلط جامعه جایی ندارند و کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند. بدین ترتیب، این رمان می‌تواند دیدگاه خواننده نسبت به جرم را از مفهوم سنتی و بسته آن به مفهومی وسیع و انتقادی توسعه دهد که در آن مفهوم جرم شامل تمام آسیب‌های زیان‌بار گروه‌های قدرت و ثروت است؛ سوای آن که توسط قانون‌گذار مورد جرم‌انگاری واقع شده یا نشده باشد.

در این فرآیند، حق بنیادین انسان‌ها به محیط زیست سالم نقض می‌شود. عدالت زیست‌محیطی، که بر توزیع برابر منافع و آسیب‌های محیط‌زیستی تأکید دارد، در برابر منطق توسعه‌گرایی سرمایه‌داری قربانی می‌شود. بومیان از بهره‌مندی از منابع طبیعی محروم می‌شوند و بدون حمایت‌های قانونی و اجتماعی، در فقر و بی‌کاری رها می‌شوند. این بی‌عدالتی ممکن است به بازتولید فقر و جرم در میان جمعیت‌های جابه‌جا شده بینجامد و فرهنگ جرم‌زای شرکت‌های بزرگ را تقویت کند که به واسطه مصونیت غیر رسمی و هژمونی اصالت سود در این شرکت‌ها جرایم زیست‌محیطی نادیده گرفته می‌شود. بنابراین، درک این چرخه، مستلزم نگاه انتقادی به نقش ساختارهای سیاسی و اقتصادی در تولید و تداوم جرایم زیست‌محیطی است. تنها با ایجاد شفافیت، پاسخ‌گویی دولت‌ها، استقلال نظارت زیست‌محیطی و مشارکت واقعی جوامع محلی می‌توان این چرخه را شکست و گامی به سوی تحقق عدالت اجتماعی و زیست‌محیطی برداشت.

References

- Abbasi, H. (2022). Dam construction, its advantages and disadvantages. *Zist Sepehr Student Magazine*, 15(1), 21-26. [In Persian] https://biosepehrs.j.ut.ac.ir/article_88988.html?lang=en

- Brisman, A. (Ed.). (2019). Stories of environmental crime, harm and protection: Narrative criminology and green cultural criminology. In *The emerald handbook of narrative criminology* (pp. 153-172). Emerald Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/978-1-78769-005-920191016>
- Brisman, O., & Sauss, N. (2017). *Green Cultural Criminology: New Strategies in Critical Criminology*. (E. Rahiminejad & M. Babaei, Trans.). Tehran: Majd Publishing. [In Persian]
- Daneshnari, H. (2018). Green and eco-global criminology. In B. Shamloo & F. Shahideh (Eds.), *New horizons in critical criminology: Effects and Prospects*. Tehran: Majd Publishing. [In Persian]
- Daneshnari, H. (2016). On Eco-global Criminology. In R. D. White, *Transnational Environmental Crimes*. Tehran: Mizan Publishing. [In Persian]
- DeKeseredy, W. S., & Dragiewicz, M. (2019). *Critical Criminology*. (A. Darvish, A. Beheshti, Z. Dadashdust, M. Janatipoor, J. Ashrafzade, Trans.). Tehran: Negah Bayene Publishing. [In Persian]
- Fearnside, P. M. (1995). Hydroelectric Dams in the Brazilian Amazon Sources of Greenhouse Gases. *Environmental Conservation*, 22(1), 7-19. <http://dx.doi.org/10.1017/S0376892900034020>
- Gholami, H., & Gholami, N. (2020). State Crime; A new Approach to the Analysis of Social Harms (Case Study: Street Children in Tehran). *Quarterly of Social Studies and Research in Iran*, 9(2), 497-518. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jisr.2020.269235.772>
- Gorji fard, H. (2016). *Green Criminology*. Tehran: Mizan Publishing. [In Persian]
- Keramati Moez, H. (2024). *Criminology (Proposing new topics in the science of criminology)*. Tehran: Sahami Enteshar Publishing. [In Persian]
- Lynch, M. J., & Long, M. A. (2022). Green criminology: Capitalism, green crime and justice, and environmental destruction. *Annual Review of Criminology*, 5(1), 255-276. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-criminol-030920-114647>
- Lynch, M. J., Stretesky, P. B., & Long, M. A. (2018). Green criminology and native peoples: The treadmill of production and the killing of indigenous environmental activists. *Theoretical Criminology*, 22(3), 318-341. <https://doi.org/10.1177/1362480618790982>
- Mansouri Moghadam, M., Fayaz, E., Nosrati, R., & Anvari, Z. (2021). Anthropological Study of the Effects of Dam Construction Projects on Local Communities in Ilam Province. *Iranian Journal of Anthropological Research*, 11(1), 151-179. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/ijar.2022.336891.459726>
- Mashhadi, A., & Fahimi, A. (2016). *Environmental protection during armed conflicts from the perspective of Islam and international humanitarian law*. Tehran: Khorsandi Publishing. [In Persian]
- Mathur, H. M. (2006). Resettling People Displaced by Development Projects: Some Critical Management Issues. *Social Change*, 36(1), 36-86. <http://dx.doi.org/10.1177/004908570603600103>
- Mazaheri, M., & Abdolmanafi, N. S. (2016). *An analysis of the status of dams and dam construction performance in Iran*. Tehran: Research Center of the Islamic Consultative Assembly. [In Persian]
- McClanahan, B., Brisman, A., & South, N. (2017). Green criminology, culture, and cinema. In *Oxford Research Encyclopedia of Criminology and Criminal Justice*.
- Momenirad, A. (2013). Qualitative content analysis in research tradition: nature, stages and validity of the results. *Quarterly of Educational Measurement*, 4(14), 187-222. [In Persian] https://jem.atu.ac.ir/article_92.html
- Najafi Abrandabadi, A. H. (2019). Developments in the criminology of white-collar crime. In S. Darabi, *Red-collar crime*. Tehran: Mizan Publishing. [In Persian]
- Nazari, J., & Mokhtaripoor, M. (2009). The role of categories and units in content analysis. *Social Sciences*, 14, 96-92. [In Persian]

- Nori Najafi, F., Veysi, H., Khoshbakhat, K., & Mirzaeitalar Poshti, R. (2019). Assessing the Impacts of Dams on the Local Community and Environment in Iran: Systematic Review. *Journal of Water and Sustainable Development*, 5(2), 141-152. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/jwsd.v5i2.67394>
- Nurse, A. (2017). Green criminology: Shining a critical lens on environmental harm. *Palgrave Communications*, 3(1), 1-4. <https://doi.org/10.1057/s41599-017-0007-2>
- O'Brien, M., & Yar, M. (2008). *Criminology: The Key Concepts*. First Published, Routledge.
- Potter, G. (2010). What is green criminology. *Sociology Review*, 20(2), 8-12. <https://doi.org/10.4324/9780203096109>
- Rahimi nejad, E. (2019). Green Cultural Criminology: From Etiology to Prevention. *Journal of Criminal Law*, 11(1), 75-102. [In Persian] <https://doi.org/10.22124/jol.2020.12114.1622>
- Sadeghi, H. (2022). Realism from a Literary School to Societal Reflection in Literature Pathology of Realism Research in Persian Literary Papers. *Contemporary Persian Literature*, 11(2), 149-164. [In Persian] <https://doi.org/10.30465/copl.2022.38871.3658>
- Shiri, A., & Jafar poor, E. (2022). Typology of state crimes based on illegal and illegitimacy laws. *Criminal law and Criminology Studies*, 51(2), 371-345. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jqclcs.2022.320644.1676>
- Smith, D. (2024). The social impacts of dams and hydropower. In *Handbook of Social Impact Assessment and Management*, 51-66. Edward Elgar Publishing. <http://dx.doi.org/10.4337/9781802208870.00011>
- South, N. (2014). Green criminology environmental crime prevention and the gaps between law, legitimacy and justice. *Revija za Kriminalistiko in Kriminologijo*, 65(4), 373-381. <http://repository.essex.ac.uk/id/eprint/18596>
- Van Uhm, D., & Zaitch, D. (2021). Defaunation, wildlife exploitation and zoonotic diseases: a green criminological perspective. In: *Notes from Isolation: Global Criminological Perspectives on Coronavirus Pandemic* (pp.11-30). Eleven International Publishing.
- White, R. (2019). Water theft in rural contexts. *International Journal of Rural Criminology*, 5(1), 140-159. <http://dx.doi.org/10.18061/1811/88725>
- White, R. D. (2015). *Crimes Against Nature: Enviromental Criminology and Ecological Justice*. (P. Namamiyan & S. Tayebi, Trans.). Tehran: Majd Publishing. [In Persian]
- White, R. D. (2016). *Transnational Enviromental Crime: toward an eco-global criminology*. (H. Daneshnari Trans.). Tehran: Mizan Publishing. [In Persian]
- White, R. D., & Haines, F. (2010). *Crime and Criminology: An introduction* (M. R. Seddiq, Trans). Tehran: Dadgostar Publishing. [In Persian]
- Zamani, B. (2024). *After the Cloud*. Tehran: Ijaz Publishing. [In Persian]



Analysis of Factors Influencing Urban Environmental Pollution in Coastal Areas (Bandar Anzali, Rezvanshahr, and Astara) Using AHP and RF Models

Zahra Pourmoghaddam ¹, Mojtaba Yamani ^{2*}, Mansour Jafar Bigloo ³

¹ Graduate of Environmental Hazards, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

² Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 01 March 2025

Revised: 10 May 2025

Accepted: 19 May 2025

Available Online: 19 May 2025

Keywords:

Caspian Sea

Coastal Environmental

Pollution

Random Forest Algorithm

Analytic Hierarchy Process (AHP)

Pollution Risk Zoning

ABSTRACT

Urban environmental pollution in coastal areas significantly impacts water and soil quality, biodiversity, public health, and tourism activities. This study aims to identify and map pollution risk zones along the coasts of Anzali, Rezvanshahr, and Astara using a hybrid approach combining the Analytical Hierarchy Process (AHP) and the Random Forest (RF) machine learning algorithm. Fourteen critical criteria—including urban wastewater, population, human activity, coastal degradation, natural attractions, and tourism infrastructure—were selected from an initial set of 24 indicators through comparative analysis. Using expert judgment, the relative weights of each factor were calculated in Expert Choice software, and GIS-based spatial layers were generated in ArcGIS Pro. The pollution risk map was created by integrating the weighted layers. The RF model was trained using 70% of the high-risk zones as training data and 30% for testing. Model validation using ROC–AUC analysis showed excellent accuracy for the RF model (AUC = 0.97). The results revealed that Anzali County had the highest proportion of very high-risk zones, while Rezvanshahr and Astara also exhibited significant high-risk areas. The findings highlight the combined impact of human and natural drivers on coastal pollution and offer valuable insights for environmental management, spatial planning, and policy interventions to mitigate future risks.

* Corresponding author: Dr. Mojtaba Yamani

E-mail address: myamani@ut.ac.ir

How to cite this article: Pourmoghaddam, Z., Yamani, M., & Jafar Bigloo, M. (2025). Analysis of Factors Affecting Urban Environmental Pollution in Coastal Areas (Bandar Anzali, Rezvanshahr and Astara) Using (AHP and RF) Models. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 211-234. <https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.92413.1554>



©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

Coastal areas require special attention due to the vulnerability of ecosystems and the dependence of human activities on them. Today, beaches have become one of the most popular destinations for tourists, and the presence of various coastal features creates diverse potentials for attracting visitors. Tourism, as a rapidly growing phenomenon, has become one of the largest industries in the world. The development of tourism and related recreational activities has a significant impact on the development patterns of regions and helps provide direct and indirect economic, social, cultural, and environmental benefits to host communities. However, at the same time, this development raises concerns and threats regarding environmental degradation and the destruction of the natural, historical, and cultural heritage of local residents. In fact, mass tourism does not equate to cleanliness or environmental sustainability. In this regard, some of the most significant impacts of tourism-related activities on the physical coastal environment include soil erosion, landslides, water quality degradation, shoreline alteration, and litter pollution. Litter pollution has become an undeniable threat to the sustainability of coastal ecosystems, and the threat posed by non-biodegradable plastic waste to coastal environments is increasingly evident. Pollution in the Caspian Sea poses a serious threat to aquatic life and human health. Unfortunately, coastal zones and estuaries are highly exposed to pollution, and this process endangers the survival of marine species. Urban environmental pollution in coastal areas can lead to a decline in water and soil quality, a reduction in biodiversity, health problems, and negative impacts on tourism and recreational activities.

Material and Methods

The main objective of this study is to identify and zone the coastal areas of the three counties of Anzali, Rezvanshahr, and Astara in terms of urban environmental pollution risk using the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Random Forest (RF) machine learning algorithm. In this regard, effective criteria were first identified. From an initial set of 24 criteria, 14 were selected: natural attractiveness, coastal degradation, river, road, human activity, urban drainage, population, urban waste, protection and management, facilities, security, natural landscapes, hotels, and the influence of tourism on population. Information layers for these were prepared in the ArcGIS Pro environment. Using the AHP method, the relative impact of each criterion was determined, and 70% of the high-risk areas were used as training data and 30% as test data for training the Random Forest algorithm. The predictive accuracy of the model results was evaluated using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve and the Area Under the Curve (AUC).

Results and Discussion

The results of validating the zoning maps using test data showed that the accuracy of the analytic hierarchy process and random forest models was 0.812 and 0.97, respectively. These results show that the random forest model has high accuracy in zoning coastal pollution. The results also show that the security criterion is the most significant in training the machine learning algorithm.

The results of coastal zone pollution zoning in the analytic hierarchy process and random forest model showed that in Anzali County, 0.82% and 10.10% were in the very low-risk class, 0.55% and 16.55% in the low-risk class, 0.6% and 0.36% in the medium-risk class, 73.89% and 27.35% in the high-risk class, and 20.6% and 24.9% in the very high-risk class. In Rezvanshahr County, 0.57% and 12.55% were in the very low-risk class, 7.09% and 28.71% in the low-risk class, 21.27% and 22.68% in the medium-risk class, 66.64% and 98% in the high-risk class, and 0.45% and 0% in the very high-risk class. In Astara County, 0.02% and 26.73% were in the very low-risk class, 6.30% and 23.21% in the low-risk class, 23.87% and 31.20% in the medium-risk class, and 6.44% and 16.51% in the high-risk class.

Conclusion

Pollution from industrial and domestic wastewater entering the coastal waters is one of the major challenges on the northern coasts of Iran. In Bandar Anzali, this problem has been exacerbated due to the lack of adequate wastewater management infrastructure and poor enforcement of environmental laws. The general conclusion for the three cities of Astara, Bandar Anzali, and Rezvanshahr shows that all three regions face specific environmental pollution challenges caused by a combination of natural and human factors. Managers and planners can effectively reduce the risks of pollution in coastal areas by using the results of this research. Furthermore, these results will help facilitate the development and implementation of practical solutions.



تحلیل عوامل مؤثر بر آلودگی محیط زیست شهری در مناطق ساحلی (بندرانزلی، رضوانشهر و آستارا) با استفاده از مدل‌های (RF و AHP)

زهرا پورمقدم^۱، مجتبی یمانی^{۲*}، منصور جعفر بیگلر^۳

^۱ دانش آموخته مخاطرات محیطی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران

^{۲*} استاد گروه جغرافیا طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران

^۳ دانشیار گروه جغرافیا طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>تاریخچه مقاله:</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹</p>	<p>آلودگی محیط زیست شهری در نواحی ساحلی تأثیرات مخربی بر کیفیت آب‌و‌خاک، تنوع زیستی، سلامت عمومی و فعالیت‌های گردشگری دارد. این پژوهش با هدف شناسایی و پهنه‌بندی نواحی پرخطر آلودگی در سواحل شهرستان‌های بندر انزلی، رضوانشهر و آستارا با استفاده از ترکیب دو روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و الگوریتم یادگیری ماشین- جنگل تصادفی (Random Forest) انجام شد. از میان ۲۴ شاخص اولیه، ۱۴ معیار کلیدی از جمله پسماند شهری، جمعیت، فعالیت انسانی، تخریب ساحل، جذابیت طبیعی و زیرساخت‌های گردشگری انتخاب و وزن‌دهی شدند. لایه‌های اطلاعاتی در محیط Arc GIS Pro تهیه و تلفیق شدند. داده‌های آموزشی (۷۰٪) و آزمایشی (۳۰٪) برای آموزش مدل RF استفاده شد. ارزیابی مدل با منحنی ROC نشان‌دهنده دقت بسیار بالای مدل RF با AUC برابر با ۰/۹۷ بود. نتایج نشان داد که شهرستان بندرانزلی بیشترین سطح نواحی با خطر بسیار زیاد را دارد، در حالی که رضوانشهر و آستارا نیز در طبقات خطر بالا قرار می‌گیرند. این مطالعه، نشان‌دهنده نقش تلفیقی عوامل طبیعی و انسانی در تشدید آلودگی ساحلی است و می‌تواند ابزاری مؤثر برای برنامه‌ریزی محیط‌زیستی و مدیریت ریسک در مناطق ساحلی محسوب شود.</p>
<p>کلمات کلیدی:</p> <p>آلودگی زیست‌محیطی نواحی ساحلی</p> <p>الگوریتم جنگل تصادفی</p> <p>فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)</p> <p>پهنه‌بندی خطر آلودگی</p>	

مقدمه

مسائل زیست‌محیطی به یکی از محورهای اصلی توجه در سال‌های اخیر تبدیل شده‌اند و به اشکال مختلف در کانون توجه قرار گرفته‌اند (Janparvar, Taghizadeh Sarokalaei & Mazloom, 2016). مناطق ساحلی به دلیل آسیب‌پذیری اکوسیستم‌ها و وابستگی فعالیت‌های انسانی به آنها، نیازمند توجه ویژه‌ای هستند. این مناطق، که زیستگاه‌های حساسی برای گونه‌های مختلف گیاهی و جانوری به شمار می‌روند، دارای منابع ارزشمند معدنی و تفریحی نیز بوده و پشتوانه‌ای حیاتی برای معیشت، شیلات و صنایع حمل‌ونقل محسوب می‌شوند (Yaghoubzadeh, Danehkar, Haghghat, Mashhadi Rafiee & Lotfikhah, 2022).

ساحل به‌عنوان سیستمی باز و پهنه‌ای بسیار پویا در مباحث ژئومورفولوژی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این سیستم همواره از دو جهت شامل حرکات آب دریا مانند امواج، جریان‌های ساحلی و پدیده‌های جزرومد (کشد) و از سوی دیگر، فرآیندهای محیط پس‌کرانه و خشکی شامل فعالیت‌های انسانی، جریان‌های رودخانه‌ای و دینامیک باد تحت تأثیر و تغییر قرار می‌گیرد (Salari Sardari, Arabzadeh, Teymuri & Jam, 2016). آلودگی دریای خزر، تهدیدی جدی برای حیات آبریان و سلامت انسان است. متأسفانه، سواحل و مصب رودخانه‌ها به‌شدت در معرض آلودگی قرار دارند و این روند، بقای گونه‌های دریایی را به خطر می‌اندازد. آلودگی آب به معنی ورود مواد مضر به آب است که باعث تغییر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی آن می‌شود. این آلودگی می‌تواند برای انسان، حیوانات و فعالیت‌های کشاورزی خطرناک باشد. منابع آلودگی به چهار دسته اصلی تقسیم می‌شوند: فاضلاب‌های شهری و روستایی که حاوی مواد آلی و میکروب‌های بیماری‌زا هستند، پساب‌های صنعتی که شامل مواد معلق و فلزات سنگین می‌شوند، پساب‌های کشاورزی که ناشی از مصرف بی‌رویه کودها و سموم شیمیایی است. آلودگی‌های نفتی و هیدروکربنی که تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌های دریایی محسوب می‌شوند.

این آلودگی‌ها به‌صورت شیمیایی، میکروبی و فیزیکی ظاهر می‌شوند که عمدتاً ناشی از افزایش جمعیت، توسعه صنعتی و فعالیت‌های کشاورزی ناپایدار هستند. همچنین از دیگر عوامل تخریب‌کننده می‌توان به افزایش جمعیت شهرها، توسعه صنایع و ورود حجم زیادی از آلاینده‌ها به محیط‌های آبی اشاره کرد که در نهایت منجر به آلودگی شدید دریای خزر می‌شود (Fathalipour, 2023).

فاضلاب یکی از راه‌های ورود مستقیم آلودگی به محیط‌های دریایی است. رودخانه‌ها با انتقال فاضلاب‌های صنعتی، کشاورزی و خانگی به دریاها، باعث آلودگی شدید زندگی آبریان می‌شوند. این آلودگی نه‌تنها سلامت موجودات دریایی را به خطر می‌اندازد، بلکه با کاهش سطح اکسیژن آب، بقای جانداران و گیاهان دریایی را نیز با مشکل روبرو می‌کند (Abirami, 2024).

گردشگری به‌عنوان یک پدیده‌ای با رشد سریع، امروزه به یکی از بزرگترین صنایع جهان تبدیل شده است. توسعه گردشگری و فعالیت‌های تفریحی وابسته به آن، تأثیر زیادی بر الگوی توسعه مناطق دارد این صنعت با تأمین مزایای اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و زیست‌محیطی چه به صورت مستقیم و چه غیرمستقیم می‌تواند به رشد جوامع میزبان کمک شایانی کند. با این حال، گسترش گردشگری همواره نگرانی‌ها و پیامدهایی دارد که می‌توان به تخریب محیط‌زیست، کاهش منابع طبیعی و آسیب به میراث تاریخی و فرهنگی جوامع محلی اشاره کرد. در حقیقت، صنعت گردشگری علیرغم تصور رایج همیشه یک فعالیت کاملاً پاک و بدون پیامدهای منفی نیست (Salehi, Ghadami & Hemmati Gouyomi, 2012). حدود ۴۰ درصد از جمعیت جهان در ساحل یا در منطقه ساحلی زندگی می‌کنند (Ghosh, 2011).

امروزه سواحل به یکی از محبوب‌ترین مقاصد گردشگری در جهان تبدیل شده‌اند. جاذبه‌های طبیعی و تنوع زیستی سواحل، پتانسیل بالایی برای جذب گردشگران ایجاد می‌کند. با این حال، توسعه فعالیت‌های گردشگری در این مناطق می‌تواند پیامدهای نامطلوبی بر محیط‌زیست ساحلی داشته باشد. از جمله مهم‌ترین این آثار می‌توان به فرسایش خاک، رانش زمین، کاهش کیفیت آب‌های ساحلی، تغییرات در خط ساحلی و آلودگی ناشی از تجمع زباله‌ها اشاره کرد (Ziari, Rezvani & Ferdowsi, 2020). تجمع

زباله‌ها به ویژه پلاستیک‌های تجزیه‌ناپذیر، امروزه به خطری جدی برای ثبات و پایداری اکوسیستم‌های ساحلی تبدیل شده‌اند (Lasaiba, 2024). براساس آمار سازمان جهانی گردشگری، بخش گردشگری ساحلی بیشترین تعداد مسافران جهانی را به خود اختصاص داده است. محبوبیت همیشگی سواحل و افزایش تقاضا برای این مناطق، برنامه‌ریزان را به توجه بیشتر به توسعه پایدار در این نواحی وا داشته است. هدف از این تلاش‌ها، حفظ منافع اقتصادی، ارتقای گردشگری و حفاظت از منابع محیط‌زیست است. نوارهای ساحلی به‌عنوان مکان‌هایی با تجمع بالای فعالیت‌های انسانی مانند بازرگانی، انرژی، مهاجرت، سکونت و گردشگری، تحت فشارهای ناشی از فعالیت‌های انسانی قرار دارند که می‌تواند تأثیرات منفی بر کیفیت محیط‌زیست بگذارد. بنابراین، ارزیابی و نظارت بر توسعه کاربری‌ها و فعالیت‌ها در این مناطق ساحلی بیش از پیش ضروری است. توسعه پایدار به‌عنوان یک فرآیند مستمر در تغییرات اقتصادی، اجتماعی و محیطی، به ارتقای رفاه و بهبود کیفیت زندگی در طولانی مدت کمک می‌کند (Darvishi, Rezaei & Shams-Aldini, 2018). پایداری طولانی مدت گردشگری به حفظ و ارتقای محیط زیست آن بستگی دارد (Arabadzhyan et al., 2021). بر اساس گزارش سازمان جهانی گردشگری (UNWTO) از هر دو گردشگر، یک نفر برای گردشگری به مناطق ساحلی سفر می‌کند. گذشته از جنبه‌های مثبت گردشگری ساحلی، مانند اهمیت بسیار زیاد آن و تأثیر آن بر اقتصاد جهانی، پیامدهای منفی به خصوص از نظر شرایط محیطی نیز به همراه دارد اثرات منفی گردشگری در اکوسیستم مناطق ساحلی به آلودگی آب، ساحل و فرسایش خط ساحلی، سوءاستفاده و تخریب صخره‌های مرجانی، تخریب زیستگاه، انقراض برخی گونه‌ها، تخریب گیاهان و جانوران، افزایش ضایعات پلاستیکی، افزایش فشار بر منابع مختلف انرژی و جابه‌جایی فیزیکی و اقتصادی جوامع محلی اشاره کرد (Kabil, Priatmoko, Magda & Denes-david, 2021). پژوهشگران در این پژوهش به دنبال پاسخ این سؤالات بودند که چه عواملی باعث آلودگی پهنه‌های ساحلی سه شهرستان می‌شود؟ همچنین، تحقیق به کندوکاو این نکته پرداخته که آیا شدت آلودگی از جلگه به سمت سواحل در این شهرستان‌ها افزایش می‌یابد یا خیر؟

در خصوص آلودگی محیطی ناشی از گردشگری، ابراهیمی و رضانی پور (Ebrahimi & Ramezanipour, 2018) در پژوهشی تحت عنوان سنجش میزان مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی گردشگران با استفاده از روش پرسشنامه‌ای انجام داده‌اند که جامعه آماری آنها گردشگرانی بوده‌اند که در فصل تابستان از شهرستان رامسر بازدید کرده بودند. این پژوهش بر مبنای فرمول کوکران تعداد ۳۸۴ نفر را به‌عنوان حجم نمونه انتخاب و به این نتیجه رسیدند که میزان تحصیلات و سن گردشگران می‌تواند تأثیر مثبتی بر مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی آنان داشته باشد. در عمومی‌ترین حالت، افراد با سطح تحصیلات بالاتر و سن بزرگ‌تر ممکن است بیشتر از اهمیت حفظ محیط‌زیست آگاهی داشته و مسئولیت‌پذیری بیشتری نسبت به آنان از خود نشان دهند.

بانسال (Bancal, 2017) در پژوهشی تحت عنوان توسعه صنعتی و چالش‌های آلودگی آب در مناطق ساحلی مورد سورات، هند به این نتیجه رسیدند که صنعتی شدن نقش مهمی در توسعه اقتصادی یک کشور دارد. و تخلیه پساب‌های تصفیه‌شده یا نیمه تصفیه شده باعث وخامت در کیفیت منابع آب سطحی بوده است و چالش‌های پیش روی شهر و آموخته‌ها می‌تواند منجر به اتخاذ سیاست‌های ابتکاری و اقدامات دیگری که می‌تواند به‌طور مؤثر به رفع این چالش‌ها کمک کند.

جورگنسن و همکاران (Jorgensen, Krasny & Baztan, 2021) در پژوهشی تحت عنوان پاک‌سازی داوطلبانه ساحل، محیط‌زیست مدنی مدیریت مبارزه با آلودگی پلاستیکی جهانی به این نتیجه رسیدند که زباله‌های دریایی، به‌ویژه آن‌هایی که از پلاستیک تشکیل شده‌اند، یکی از چالش‌های اصلی زیست‌محیطی در سطح جهانی به شمار می‌روند. این معضل نه تنها به سواحل و اکوسیستم‌های دریایی آسیب می‌زند، بلکه بر سلامت بشر و تنوع زیستی نیز تأثیر می‌گذارد. جوامع ساحلی به‌عنوان پاسخ به این چالش، به فعالیت‌های داوطلبانه پاک‌سازی سواحل روی آورده‌اند که فراتر از یک عمل محلی، می‌تواند تأثیرات گسترده‌تری در سطح جهانی داشته باشد. و با استفاده از روش‌های نظارت بر محیط‌زیست و بوم‌شناسی مدنی، تحلیل محتوا از ۵۰ گروه فعال در این زمینه انجام شده است.

گارسز آردونز و همکاران (Garcés-Ordóñez, Díaz, Cardoso & Muniz, 2020) در پژوهشی تحت عنوان تأثیر گردشگری بر آلودگی زباله‌های دریایی در سواحل سانتا مارتا، کارائیب کلمبیا به این نتیجه رسیدند که در فصول توریستی بالا، تعداد گردشگران و آلودگی ماکرولیترا به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در این فصل، پلاستیک‌ها بین ۳۰ تا ۷۷ درصد از کل ماکرولیترا را تشکیل می‌دهند. همچنین، غلظت میکروپلاستیک‌ها نیز از ۱ تا ۳۵۵ در متر متغیر بود. در بازخورد نظرسنجی‌ها، گردشگران به‌عنوان منبع اصلی زباله‌ها شناسایی شدند و پلاستیک به‌عنوان رایج‌ترین نوع زباله گزارش شد.

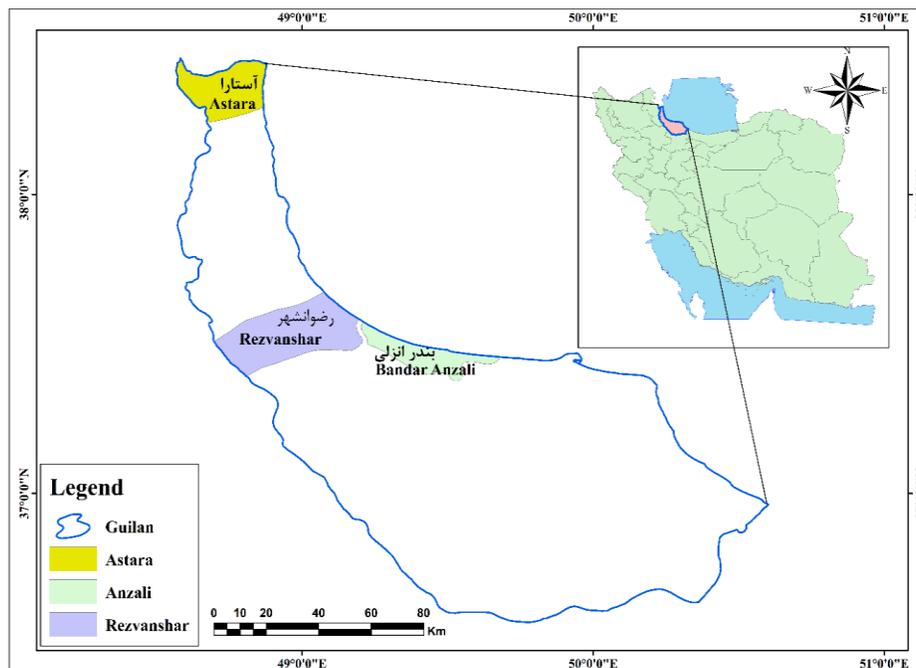
بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات انجام شده به بررسی نقش گردشگران در آلودگی مناطق ساحلی و چالش‌های زیست محیطی سواحل اشاره داشته‌اند مطالعات کمتری به بررسی نقش سایر عوامل مؤثر در آلودگی مناطق ساحلی و تعیین و شناسایی پهنه‌های آلودگی پرداخته‌اند. در این پژوهش با به کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی به‌عنوان ابزاری قدرتمند جهت تهیه و آماده‌سازی عوامل مؤثر و تجزیه و تحلیل آنها استفاده گردید. از نوآوری این پژوهش می‌توان از به کارگیری و مقایسه روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و جنگل تصادفی در پهنه‌بندی آلودگی مناطق ساحلی و تعیین مهمترین عوامل از کارشناسان خبره نام برد.

منطقه مورد مطالعه

بندر انزلی اولین و بزرگترین بندر سواحل جنوبی دریای خزر در منطقه جلگه‌ای و ساحلی استان گیلان در طول شرقی ۴۹ درجه و ۲۸ دقیقه و عرض شمالی ۳۷ درجه و ۲۸ دقیقه واقع شده است. بخش مهمی از محیط زیست طبیعی این شهرستان را دریا (۴۰ کیلومتر نوار ساحلی) و بخش مهم دیگر را اکوسیستم ارزشمند تالاب انزلی با مساحتی بالغ بر ۲۷۵ کیلومتر مربع تشکیل می‌دهد که ۳۳ کیلومتر مربع آن به مساحت شهری اختصاص یافته و دارای بافتی خطی است (Pourshikhian, Amar & Ebrahimi, 2012). شهرستان رضوانشهر یکی از شهرستان‌های مهم در شمال غربی استان گیلان می‌باشد که بین سواحل دریای خزر و رشته کوه‌های تالش قرار دارد این شهرستان از دو بخش جلگه‌ای و کوهستانی تشکیل شده است. شهرستان رضوانشهر در طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۷ دقیقه و در عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۳۳ دقیقه و ارتفاع ۵ متر از سطح دریا واقع است. شهرستان آستارا با توجه به نقشه جغرافیایی، این شهرستان در ۴۸ درجه و ۵۲ دقیقه و ۳۰ ثانیه طول شرقی و در ۳۸ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی جغرافیایی از خط استوا شده است (Haji Amiri, Asghari, Amar & Poursheykhian, 2023). مساحت این شهرستان بالغ بر ۳۳۰ کیلومتر مربع است (Movahedi & Rostami, 2021). شکل ۱، موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

مواد و روش‌ها

با توجه به اینکه هدف از این پژوهش پهنه‌بندی آلودگی محیط زیستی شهری در مناطق شهری می‌باشد؛ در همین راستا ابتدا جمع‌آوری اطلاعات به‌صورت مطالعات کتابخانه‌ای و سپس میدانی انجام شد که از منابع مختلف مانند سازمان محیط‌زیست گیلان (آمار پسماندهای شهری و فاضلاب‌های شهری سه شهرستان) و سازمان میراث فرهنگی گیلان (آمار ورود گردشگران در سه شهرستان) گردآوری شدند. بر اساس پیشینه پژوهش ابتدا ۲۴ معیار به‌منظور بررسی آلودگی محیط زیست شهری انتخاب شد (جدول ۱). در ادامه ۱۴ معیار شامل: امکانات، هتل‌ها، امنیت، مناظر طبیعی، حفاظت و مراقبت، جاده‌ها، رودخانه‌ها، ارجحیت گردشگری بر جمعیت، فعالیت انسانی، تخریب ساحل، جذابیت طبیعی، پسماند شهری، فاضلاب شهری و جمعیت در مناطق مورد مطالعه، تعریف و در محیط نرم‌افزار Arc GIS Pro آماده‌سازی شد. قابل ذکر است داده‌های هر معیار شامل داده‌های اولیه از طریق بازدید میدانی، مشاهده و پرسشنامه حاصل شد و داده‌های ثانویه از منابع مختلفی چون سازمان محیط‌زیست گیلان و سازمان میراث فرهنگی گیلان، پایگاه OSM و سایت آمار دریافت شد و در محیط Arc GIS Pro رقومی‌سازی شد. همچنین از نرم‌افزار Google Earth جهت شناخت بهتر معیارها و برداشت معیارها در مناطق مورد مطالعه، استفاده شد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

Fig.1. Geographical location of the study area

بعد از تعریف و آماده‌سازی معیارهای ۱۴ گانه جهت محاسبه وزن و ضریب اهمیت هر یک از معیارهای پژوهش از روش AHP استفاده گردید. روش‌های مختلفی جهت محاسبه وزن معیارها در تحلیل سلسله مراتبی AHP وجود دارد که در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice محاسبه انجام گرفت (شکل ۲). این متغیرها با رجوع به دستگاه‌ها و ادارات از قبیل سازمان محیط زیست، سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری، شهرداری، سازمان آب و فاضلاب، سازمان جهاد کشاورزی و سایر ارگان‌های مرتبط در اختیار قرار گرفته شد که با توجه به موضوع و هدف تحقیق از پرسشنامه و نظرات کارشناسان خبره (۳۰ نفر از کارشناسان حوزه‌های ذکر شده) استفاده و سپس به صورت مستقل ماتریس مقایسه زوجی تشکیل شد و در نهایت با میانگین وزن نهایی معیارها محاسبه شد، همچنین میزان نرخ ناسازگاری در تمامی پرسشنامه‌ها کمتر از ۰/۱ بوده است. بعد از تهیه نقشه‌های وزن‌دهی شده و تحلیل معیارها، اقدام به همپوشانی نقشه‌های تولیدشده در محیط نرم‌افزار Arc GIS Pro گردید و نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر آلودگی پهنه‌های ساحلی ارائه شد.

مدل فرایند تحلیل سلسله مراتبی AHP یک روش چند معیاره مؤثر و قابل انعطاف به شمار می‌آید. این روش در تعیین اولویت‌ها و اتخاذ بهترین تصمیم‌ها در شرایطی که نیاز به ارزیابی جنبه‌های کمی و کیفی یک تصمیم وجود دارد، یاری می‌کند (Maghsoudi, Mohammad Khan & Gholami, 2023). روند کلی پژوهش در شکل ۳، نمایش داده شده است.

الگوریتم جنگل تصادفی

بخش دوم روش پژوهش این مطالعه پهنه‌بندی آلودگی محیط زیست شهری در مناطق شهری با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی می‌باشد. الگوریتم ذکر شده از نوع روش یادگیری نظارت شده است که از تلفیق درخت وایازی و طبقه‌بندی حاصل می‌شود و تا به امروز یکی از بهترین و کاربر پسندترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین است (Breiman, 2001). در این مدل، نمونه‌گیری تصادفی از اطلاعات و متغیرها، به صورت خودکار و تکرارشونده به منظور تولید انبوهی از درختان رگرسیونی انجام خواهد شد. برای

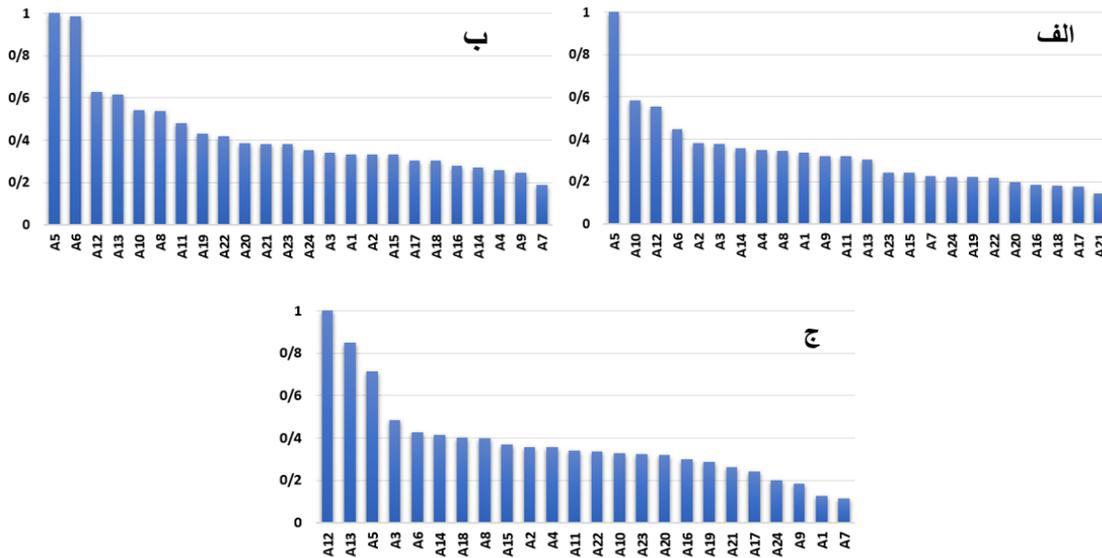
تعیین تعداد درختان بهینه، ابتدا یک تعداد درخت اولیه برای تولید منحنی تغییرات میانگین مربعات خطا (MSE) در مقابل تعداد مشخصی از درختان نمونه آموزشی و ارزیابی ایجاد می‌شود (Karnejadi, Ownegh, Pourghasemi, Bahremand & Motamedi, 2019).

در این پژوهش به منظور به کارگیری این الگوریتم در ارزیابی آلودگی محیط زیست شهری، به زبان پایتون و کتابخانه Scikit Learn و پکیج Platform Zpyder استفاده شد. در همین راستا این الگوریتم نیازمند نمونه‌های آموزشی با تعداد و توزیع کافی و به صورت پراکنده در سطح مناطق می‌باشد نمونه‌های مربوط به مناطق آلوده ساحلی با بازدیدهای میدانی شناسایی و در سطح مناطق برداشت شد که ۷۰٪ از نمونه‌ها جهت آموزش مدل و ۳۰٪ باقیمانده برای اعتبار سنجی نتایج مدل استفاده شد. علاوه بر نمونه‌های آموزشی، معیارهای مؤثر بر آلودگی مناطق ساحلی به عنوان فاکتور مستقل در پهنه‌بندی به کار گرفته خواهد شد.

جدول ۱- شاخص‌های مؤثر در پهنه‌بندی آلودگی سواحل مناطق مورد مطالعه

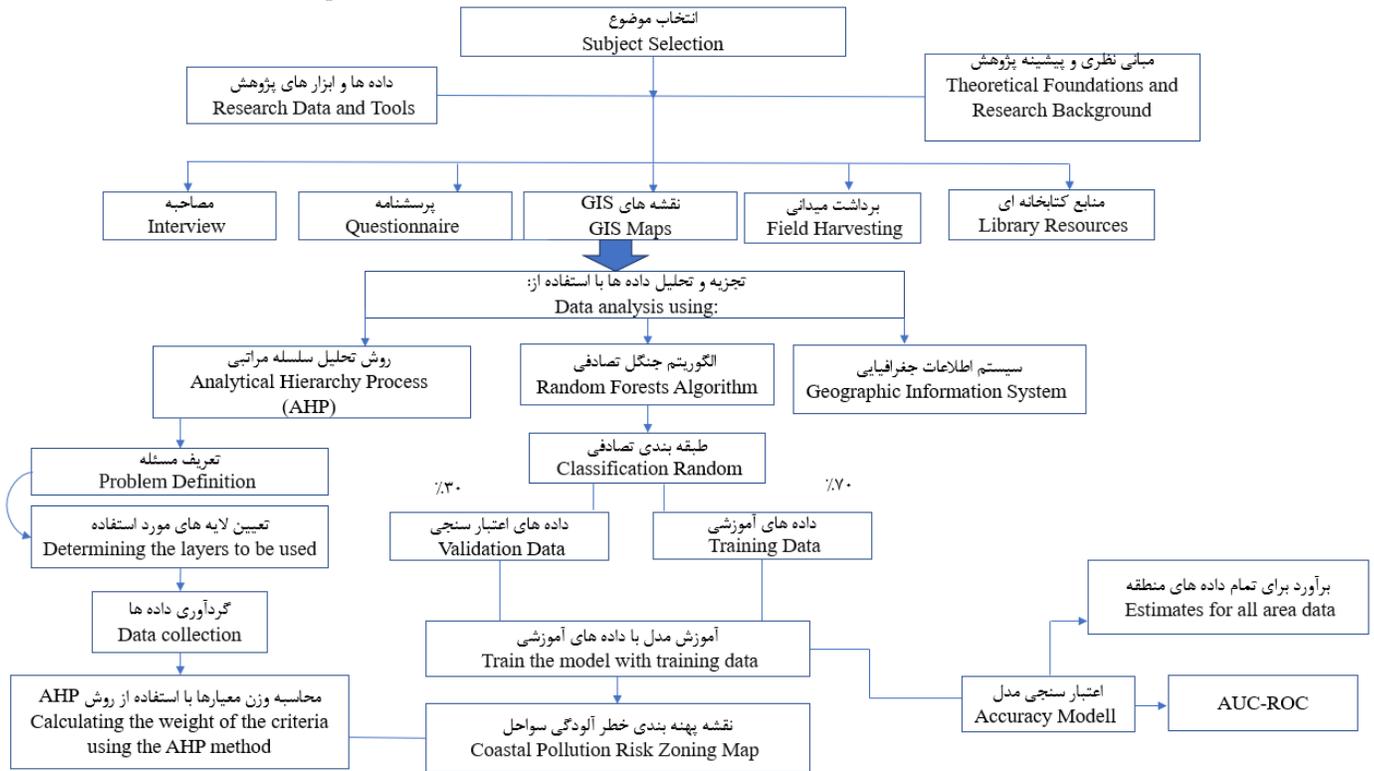
Table 1- Effective indicators in coastal pollution zoning of the studied areas

شماره	معیار	شماره	معیار
Number	Criteria	Number	Criteria
	درجه استفاده بی‌رویه از منابع آبی در ساحل توسط گردشگران	A13	میزان غلظت مواد آلاینده در آب و خاک
	Degree of excessive use of water resources on the coast by tourists	A13	Concentration of pollutants in water and soil
	تأثیر گردشگری بر جمعیت محلی و فرهنگ محلی ساحل	A14	درجه آلودگی سطح آب و خاک
	The impact of tourism on the local population and local culture of the coast	A14	Degree of contamination of water and soil surfaces
	تعداد بازدیدکنندگان	A15	اندازه تراکم جمعیت
	Number of visitors	A15	Population density size
	درآمد از گردشگری	A16	مقدار استفاده از پهنه ساحلی
	Income from tourism	A16	Amount of coastal zone use
	تعداد هتل‌ها و امکانات اقامتی	A17	پسماندهای خانگی و صنایع آلوده‌ساز
	Number of hotels and accommodation facilities	A17	Household waste and polluting industries
	تنوع فعالیت‌های گردشگری	A18	میزان حفاظت و مراقبت
	Diversity of tourism activities	A18	The level of protection and care
	امکانات و خدمات عمومی	A19	تنوع زیستی
	Public facilities and services	A19	Biodiversity
	امنیت	A20	فعالیت‌های انسانی
	Security	A20	Human activities
	جذابیت طبیعی	A21	ارزش مناظر طبیعی
	Natural charm	A21	The value of natural landscapes
	فرهنگ و تاریخچه	A23	مقدار تولید زباله توسط گردشگران
	Culture and history	A23	Amount of waste produced by tourists
	دسترسی و حمل و نقل	A24	میزان آلودگی آب دریا به دلیل فاضلاب گردشگران
	Access and transportation	A24	The level of seawater pollution due to tourist sewage
			تخریب و تغییر در محیط طبیعی ساحل به دلیل تمرکز گردشگران
			Destruction and change in the natural environment of the beach due to the concentration of tourists



شکل ۲ - وزن نهایی معیارهای مؤثر در آلودگی پهنه‌های ساحلی، مقایسه زوجی متغیرهای پژوهش توسط خبرگان در سه شهرستان، الف) رضوانشهر، ب) آستارا و ج) بندرانزلی

Fig.2. Final weight of effective criteria in coastal zone pollution, pairwise comparison of research variables by experts in three cities, a) Rezvanshahr, b) Astara, and c) Bandar Anzali



شکل ۳ - مراحل و روند کلی پژوهش

Fig.3. General Research Steps and Process



شکل ۴- الف) انباشت زباله‌ها توسط گردشگران در جنگل گیسوم رضوانشهر ب) انباشت زباله‌ها توسط گردشگران در اطراف رودخانه مرداب آستارا ج) انباشت زباله‌ها توسط گردشگران بلوار مقابل ساحل آستارا د) انباشت زباله در بلوار منتهی به ساحل کاسپین بندرانزلی

Fig.4. A): Garbage accumulation by tourists in the Gisom forest of Rezvanshahr B): Garbage accumulation by tourists around the Mardab River in Astara C): Garbage accumulation by tourists on the boulevard in front of the Astara beach D): Garbage accumulation on the boulevard leading to the Caspian coast in Bandar Anzali

ارزیابی کارایی مدل‌ها

به منظور ارزیابی صحت نقشه‌های نهایی مدل‌ها از منحنی ویژگی عملگر نسبی ROC استفاده شد. سطح زیر منحنی AUC نام دارد. این منحنی مشخصه عملکرد نسبی هر مدل را نشان می‌دهد و نموداری است که در آن نسبت پیکسل‌هایی که وقوع یا عدم وقوع آلودگی به وسیله مدل به درستی پیش‌بینی شده روی محور افقی (مثبت درست یا Specificity) در برابر مقدار مکمل آن یعنی نسبت پیکسل‌هایی که نادرست پیش‌بینی شده‌اند (مثبت غلط یا Sensitivity) روی محور عمودی ترسیم می‌شود. در این پژوهش این منحنی در نرم‌افزار GIS Pro با استفاده از افزونه Arc SDM و تابع ROC رسم شد. نتایج AUC بین ۰/۵ تا ۱ متغیر است. مقادیر عدد ۰/۵ به معنی ضعیف بودن نتایج و مقادیر عدد نزدیک به ۱ نشان‌دهنده نتایج مطلوب صحت مدل می‌باشد (Chen et al., 2020).

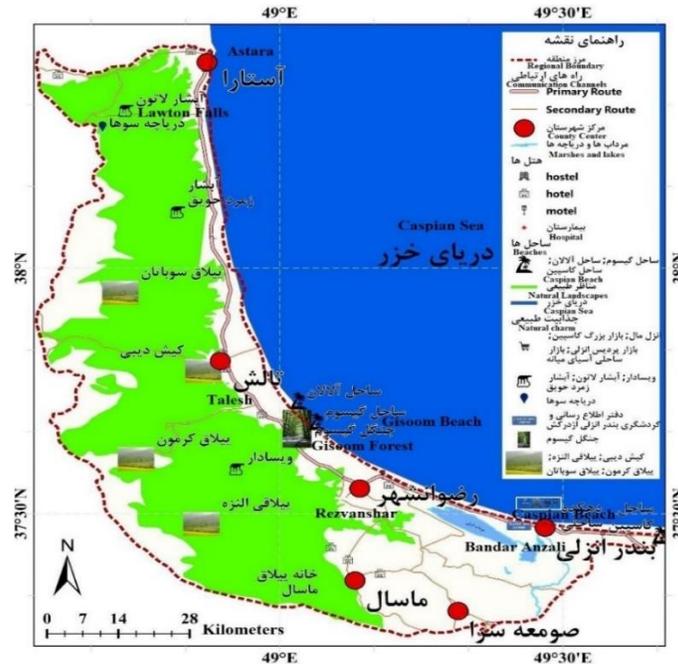
نتایج و بحث

نقشه گردشگری

نقشه گردشگری به عنوان یک ابزار تحلیلی و کارآمد، به شناسایی و ارزیابی جاذبه‌های گردشگری خاص، به ویژه در نواحی ساحلی پرداخته است. این نقشه با استفاده از فناوری‌های نوین، اطلاعات مکانی و داده‌های مرتبط را به گونه‌ای یکپارچه‌سازی می‌کند که امکان تحلیل دقیق ویژگی‌ها و پتانسیل‌های گردشگری مناطق ساحلی را فراهم می‌کند (شکل ۵).

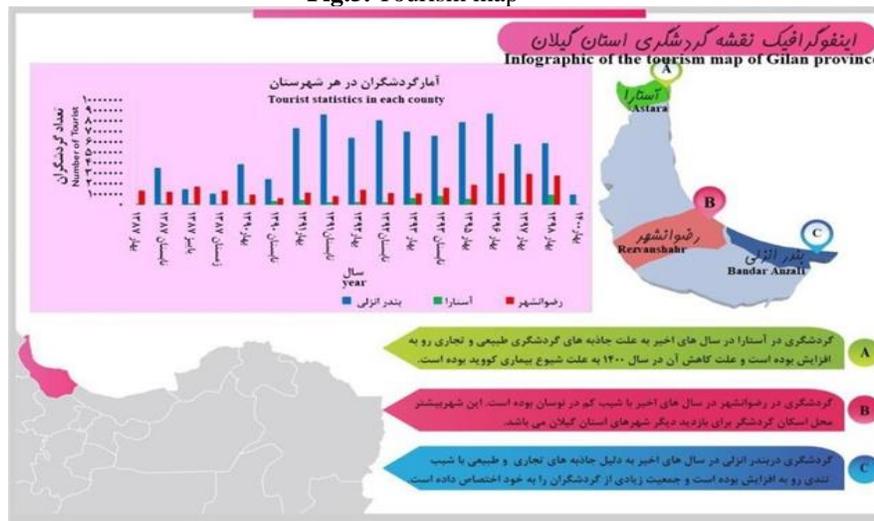
آمار گردشگران مناطق مورد مطالعه در شکل ۶، نمایش داده شده است. این آمار بر اساس ورود گردشگران به شهرستان‌های مورد مطالعه، در سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۰ از سازمان میراث فرهنگی و سایت آمار دریافت شد. با توجه به نمودار آمار گردشگران مناطق مورد مطالعه، تعداد گردشگران در شهرستان‌های مختلف بسته به جاذبه‌ها و امکانات با فراز و نشیب روبه‌رو بوده است. لذا طبق آمار

دریافتی از سازمان میراث فرهنگی تعداد گردشگران در مناطق مورد مطالعه متغیر بوده است. قابل ذکر است به غیر از سال ۱۴۰۰ که کشور درگیر بیماری کوئید ۱۹ بوده در دیگر سال‌ها آمار گردشگران با شیب ملایمی رو به رشد بوده است. شهرستان بندرانزلی و رضوان شهر از آمار گردشگران بالاتری نسبت به شهرستان آستارا برخوردار هستند. شهرستان آستارا بر اساس مصاحبه‌های انجام شده و مشاهدات میدانی به دلیل بعد مسافت از حجم گردشگران کمتر و اقامت طولانی مدت آنها برخوردار است.



شکل ۵- نقشه گردشگری

Fig.5. Tourism map



شکل ۶- اینفوگرافیک آمار گردشگران مناطق مطالعاتی (سازمان میراث فرهنگی)

Fig.6. Infographic of tourist statistics in the study areas (Cultural Heritage Organization)

ارجحیت متغیرهای مورد بررسی

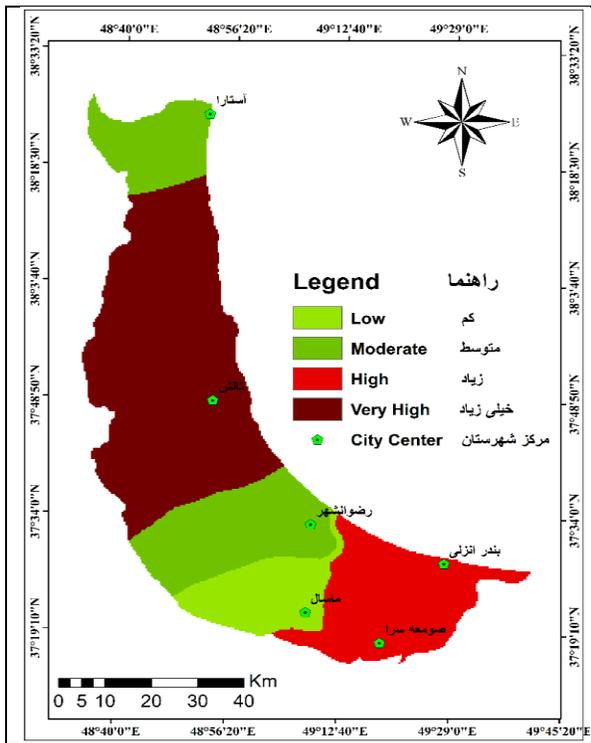
پسماند شهری: معیار پسماند شهری، یکی از مهمترین عناصر در آلوده شدن سواحل در شهرستان‌های جلگه‌ای می‌باشد. نقشه ۷ این معیار در شکل ۷، نمایش داده شده است در این نقشه، هر چقدر از طبقه کم به سمت طبقه خیلی زیاد پیش می‌رویم میزان پسماند افزایش می‌یابد. به طوری که شهرستان بندرانزلی به‌عنوان یک شهر بندری و گردشگرپذیر با جمعیت بالای بومی و گردشگران، پسماند زیادی تولید می‌کند. با وجودی که گردشگران در شهرستان رضوان‌شهر بیشتر هستند اما اقامت آنها به صورت موقت می‌باشد این امر در بازدیدهای میدانی نیز مشاهده شد به همین دلیل کمترین پسماند را دارد. اما شهرستان آستارا به دلیل موقعیت بندری خود موجب اقامت طولانی‌تر گردشگران و آشنایی ساکنان محلی با محیط‌زیست، امتیاز بالاتری در تولید پسماند دارد.

فاضلاب شهری: مسئله فاضلاب شهری، یکی از چالش‌های مهم در بسیاری از مناطق شهری، خصوصاً در سواحل شمالی ایران است. نقشه ۸ این معیار در شکل ۸، نمایش داده شده است در این نقشه، هر چقدر از طبقه کم به سمت طبقه خیلی زیاد پیش می‌رویم میزان فاضلاب افزایش می‌یابد. به طوری که شهرستان بندرانزلی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بنادر شمال ایران و شهری با جمعیت بالا با افزایش فاضلاب شهری روبه‌رو است. توسعه صنعتی و جمعیت زیاد در این منطقه، منجر به تولید فاضلاب بیشتر می‌شود شهرستان آستارا به دلیل موقعیت مرزی و جمعیت زیادی که دارد از نظر زیرساخت‌های گردشگری مانند هتل‌ها، رستوران‌ها و امکانات تفریحی کمتر توسعه یافته است این موضوع می‌تواند مانع از جذب گردشگران شود. در مقابل، شهرستان رضوان‌شهر به دلیل داشتن امکانات بهتر و جاذبه‌های گردشگری متنوع‌تر، موفق به جلب بیشتر گردشگران و باعث افزایش میزان تولید فاضلاب شهری شده است و این شهرستان‌ها به دلیل عدم داشتن سیستم تصفیه فاضلاب به‌صورت نامطلوب و بدون تصفیه به رودخانه‌ها و در نهایت به دریا تخلیه می‌شود.

فعالیت انسانی: سواحل بندرانزلی و رضوان‌شهر به‌عنوان نقاط مهم گردشگری و اقتصادی در استان گیلان، فعالیت‌های متنوعی را تجربه می‌کنند. نقشه این معیار در شکل ۹، نمایش داده شده است در این نقشه، هر چقدر از طبقه خیلی کم تا خیلی زیاد پیش می‌رویم میزان فعالیت انسانی افزایش می‌یابد. به طوری که شهرستان رضوان‌شهر با سواحل زیبا، مقصد محبوب گردشگری است، در حالی که بندرانزلی به‌عنوان یک بندر تجاری و حمل‌ونقل کالا شناخته می‌شود. برعکس، آستارا به‌عنوان یک شهر مرزی با سواحل زیبا، از نظر فعالیت‌های انسانی کمتر توسعه یافته است.

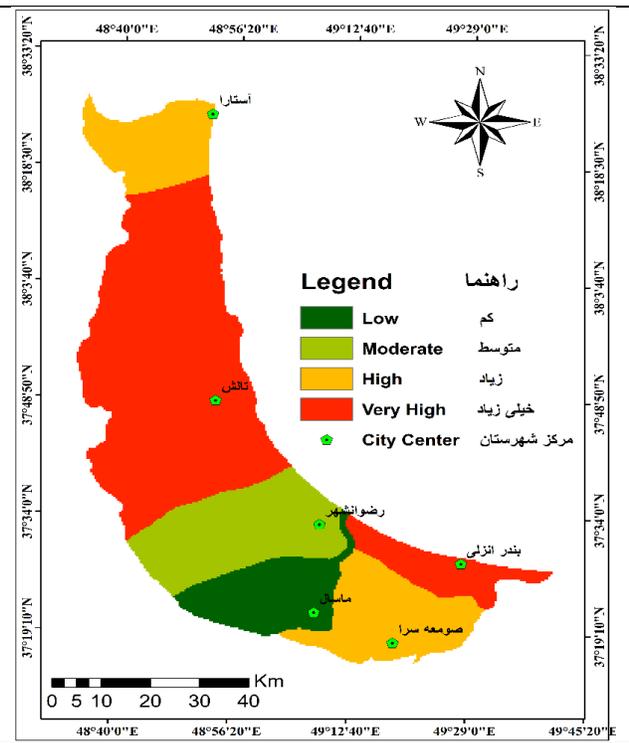
حفاظت و مراقبت: نقشه حفاظت و مراقبت در مدیریت محیط‌زیست نقش کلیدی در کاهش آلودگی و حفظ اکوسیستم ساحلی دارد. نقشه این معیار در شکل ۱۰، در دو کلاس مناطق حفاظت شده و حفاظت نشده با رنگ سبز و رنگ صورتی نمایش داده شده است. در آستارا، سواحل و تالاب استیل تحت حفاظت بوده و به جذب گردشگران و بهبود صنعت گردشگری کمک می‌کند، در حالی که بندر انزلی فعالیت مؤثری در حفاظت محیط زیست ندارد و این امر به آلودگی بیشتر و تغییر چشم‌انداز کمک کرده است. همچنین، رضوان‌شهر در مقایسه با دو شهرستان دیگر از نظر حفاظت سواحل در موقعیت پایین‌تری قرار دارد.

تخریب ساحل: شهرستان‌های ساحلی به دلیل ظرفیت‌های گردشگری، در حال توسعه تأسیسات جدیدی مانند هتل‌ها و رستوران‌ها هستند، اما این توسعه بدون نظارت می‌تواند اکوسیستم‌های طبیعی را تحت تأثیر قرار دهد. نقشه این معیار در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده است. در این نقشه هر چقدر از طبقه خیلی کم به سمت خیلی زیاد پیش می‌رویم میزان تخریب افزایش می‌یابد. به طوری که بندرانزلی و رضوان‌شهر به دلیل ورود بالای گردشگران و ساخت و سازهای غیرقانونی با مشکلات زیست‌محیطی بیشتری مواجه هستند و آستارا با اجرای پروژه‌های حفاظتی، تخریب کمتری را تجربه کرده است. افزایش جمعیت و گردشگران بدون برنامه‌ریزی منجر به تولید فاضلاب بیشتر و تخریب محیط‌زیست ساحلی می‌شود.



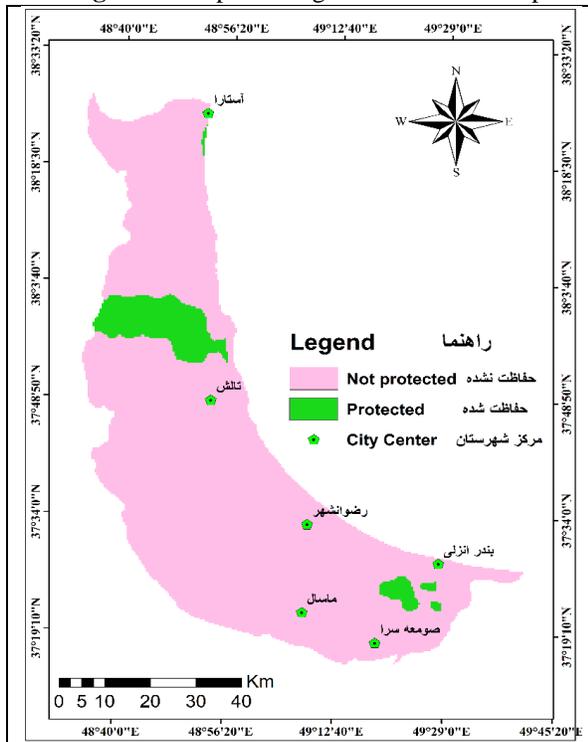
شکل ۸- نقشه طبقه‌بندی شده فاضلاب شهری

Fig.8. Municipal Sewage Classification Map



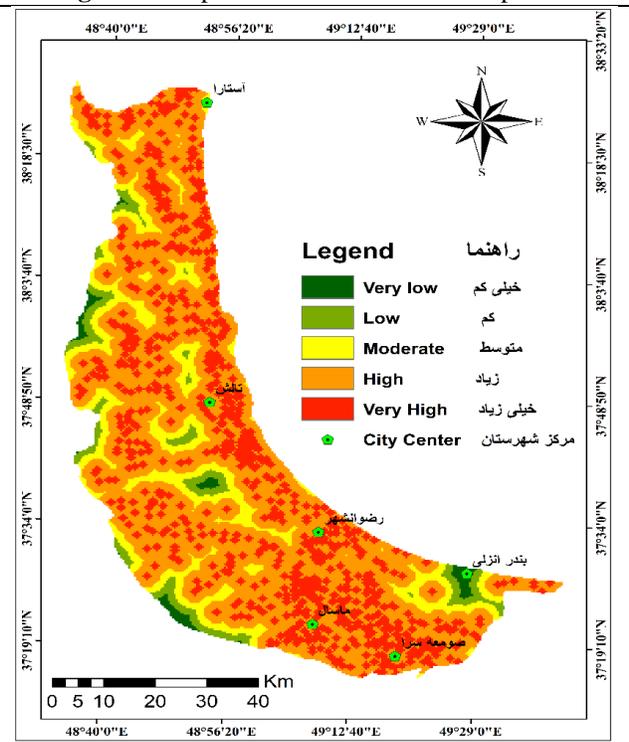
شکل ۷- نقشه طبقه‌بندی شده پسماند شهری

Fig.7. Municipal Waste Classification Map



شکل ۱۰- نقشه طبقه‌بندی شده حفاظت و مراقبت

Fig.10. Protection and Care Classified Map



شکل ۹- نقشه طبقه‌بندی شده فعالیت انسانی

Fig.9. Human Activity Classified Map



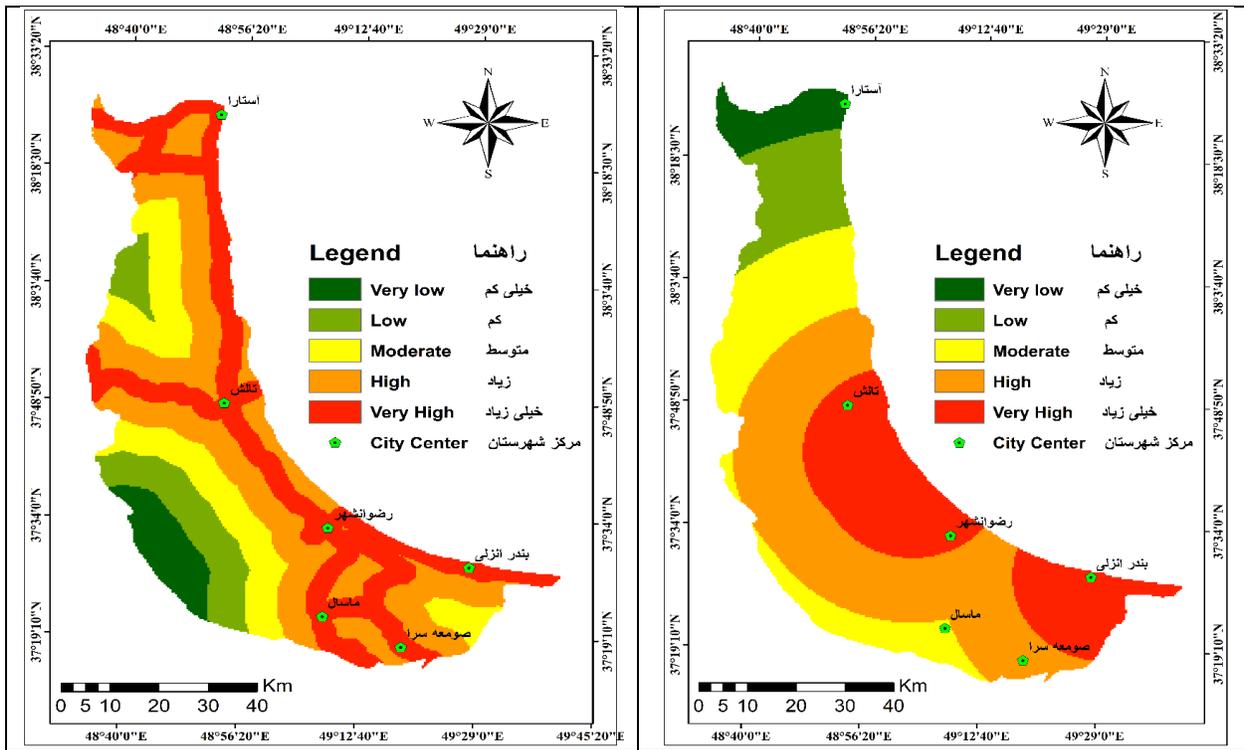
شکل ۱۱- الف) ساحل محصور در ساحل آستارا ب) شروع ساخت و سازها در ساحل

Fig.11. A) Enclosed beach on Astara coast, B) Construction begins on the beach

دسترسی و حمل و نقل (جاده): دسترسی یکی از عوامل اصلی افزایش گردشگر در یک منطقه می‌باشد. نقشه این معیار در شکل ۱۳، نمایش داده شده است. در این نقشه، هر چقدر از طبقه خیلی کم به سمت خیلی زیاد پیش می‌رویم میزان دسترسی افزایش می‌یابد. شهرستان بندرانزلی به‌عنوان یکی از مقاصد اصلی گردشگری با جاده‌های دسترسی مناسب به سواحل، شاهد افزایش جمعیت گردشگران و در نتیجه تولید پسماند و آلودگی است. در مقابل، شهرستان رضوان‌شهر به دلیل عدم وجود جاده نزدیک به سواحل، نتوانسته به‌خوبی از پتانسیل‌های گردشگری خود بهره‌برداری کند. شهرستان آستارا نیز با وجود چالش‌های مشابه در زمینه آلودگی، با تجمع گردشگران و عدم مدیریت مناسب پسماندها، به یکی از معضلات اصلی خود تبدیل شده است.

جاذبیت طبیعی: جاذبه‌های طبیعی از جمله آبشارها باعث جذب گردشگر در یک منطقه می‌شود. نقشه این معیار در شکل ۱۴، نمایش داده شده است. در این نقشه هر چقدر از طبقه خیلی کم به سمت خیلی زیاد پیش می‌رویم جاذبیت طبیعی مناطق مورد مطالعه افزایش می‌یابد. نواحی نزدیک به سواحل شهرستان بندرانزلی به دلیل جاذبیت‌های ساحلی، استقبال بالایی از گردشگران دارند، در حالی که آستارا با وجود کمبود گردشگر در سواحل، جاذبه‌های طبیعی خوبی دارد. آستارا با چالش‌های آلودگی ناشی از پسماندهای خانگی و صنایع و نواحی ساحلی‌اش با آلودگی کمتر مواجه است، در حالی که بندرانزلی با تخریب محیط طبیعی و ظرفیت محدود به دلیل جمعیت بالای گردشگران روبه‌رو است. شهرستان رضوان‌شهر نیز با تولید زباله از سوی گردشگران آلوده است، اما تردد موقت آن‌ها باعث کاهش پسماند می‌شود.

جمعیت: جمعیت و رشد آن نقش مهمی در افزایش آلودگی سواحل مناطق شمالی دارد. در مناطق مورد مطالعه بندرانزلی به‌عنوان یکی از مقاصد گردشگری محبوب در گیلان، جمعیتی بیشتر از آستارا و رضوان‌شهر دارد، اما مساحت کمتری دارد که نشان‌دهنده تمرکز بالای جمعیت در این منطقه است. شهرستان رضوان‌شهر با مساحت بیشتر و زمین‌های کشاورزی، به رغم توسعه شهری بیشتر، جمعیت کمتری نسبت به بندرانزلی دارد. آستارا نیز با جمعیتی متعادل و مساحتی مناسب، توانسته است امکانات زیستی و اقتصادی خوبی برای ساکنان خود فراهم کند (شکل ۱۵).

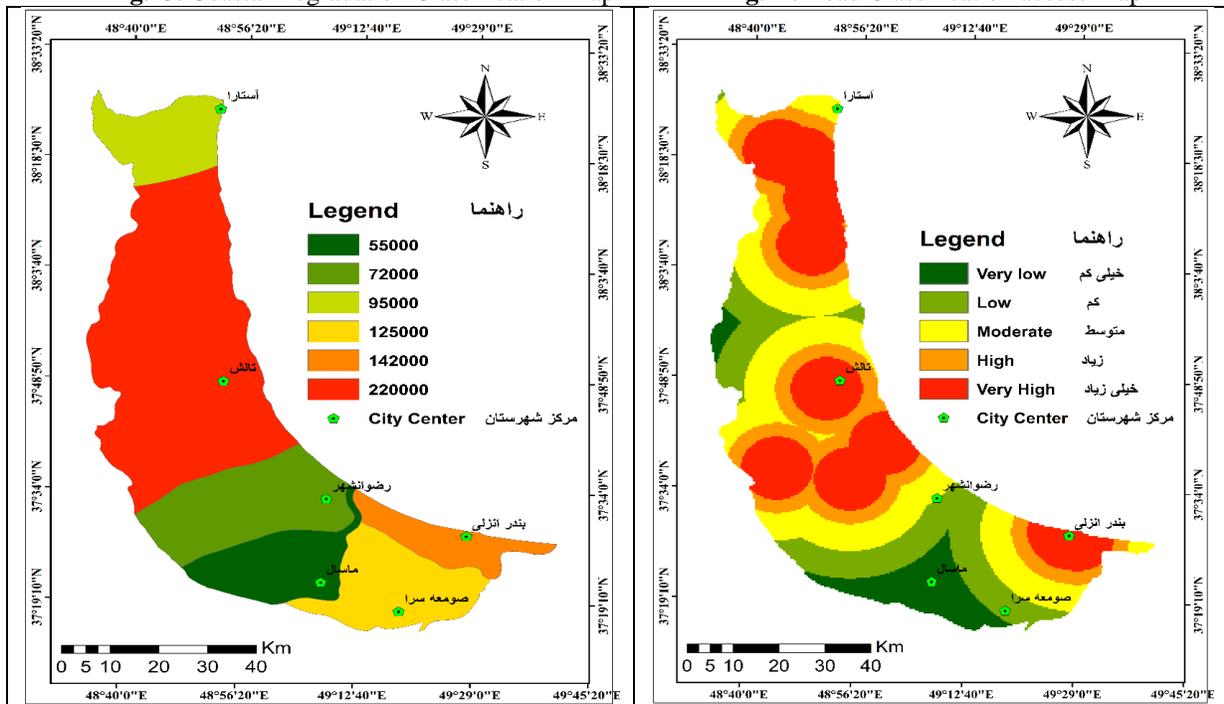


شکل ۱۳- نقشه طبقه‌بندی شده دسترسی به جاده

شکل ۱۲- نقشه طبقه‌بندی شده تخریب ساحل

Fig.13. Coastal Degradation Classification Map

Fig.12. Road Classification access Map



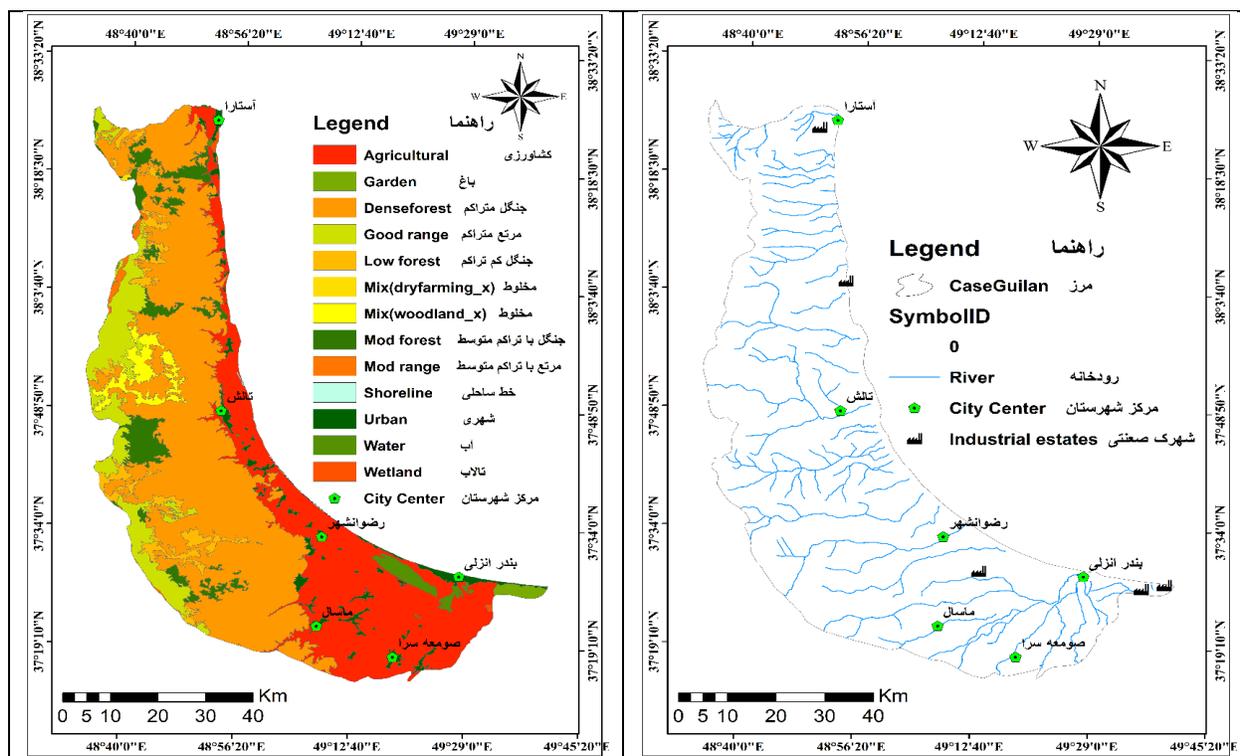
شکل ۱۵- نقشه طبقه‌بندی شده جمعیت

شکل ۱۴- نقشه طبقه‌بندی شده جذابیت طبیعی

Fig.15. population classification

Fig.14. Natural Attraction Classification Map

استقرار صنایع نزدیک رودخانه: استقرار صنایع در نزدیکی رودخانه‌های منتهی به سواحل شهرستان‌های بندر انزلی، رضوان شهر و آستارا نقش قابل توجهی در آلودگی این مناطق دارد. طبق نقشه صنایع در شهرستان بندرانزلی دو شهرک صنعتی مهم و نزدیک رودخانه وجود دارد. این دو شهرک صنعتی، بیشترین درصد آلودگی را داشته و پسماند خود را به‌طور مستقیم به ساحل و دریا تخلیه می‌کنند. نکته مهم دیگری که در این فرآیند تأثیرگذار است، شیب اندک سطح جلگه ساحلی است. این ویژگی موجب کندی جریان تخلیه آلاینده‌ها شده و آلودگی را در سطح وسیع‌تری توزیع می‌کند. نکته مهم، وجود اراضی کشاورزی در بخش پایین دست جلگه است. سموم و کودهای شیمیایی مورد استفاده در این اراضی توسط پساب‌های زهکشی به‌طور غیرمستقیم وارد رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی می‌شود. این مواد اثرات مخربی بر آلودگی محیط‌زیست بخش ساحلی، پس کرانه و محیط دریا دارند. از طرفی محدوده جلگه ساحلی در شهرستان رضوان شهر و آستارا نسبت به شهرستان بندرانزلی از شیب بیشتری برخوردار است. همچنین بخش کمتری از آنها زیر پوشش زمین‌های کشاورزی و بخش زیادی از جلگه ساحلی در قلمرو اراضی جنگلی و مراتع می‌باشد. از این رو بخش کمتری از این دو شهرستان تحت تأثیر فاضلاب و پسماندهای آلاینده قرار گرفته‌اند (شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸).



شکل ۱۷- نقشه کاربری اراضی

Fig.17. Land use map

شکل ۱۶- نقشه رودخانه‌ها و صنایع

Fig.16. Rivers and industries map



شکل ۱۸- بازدید میدانی از رودخانه مرداب نزدیک زمین کشاورزی، شهرستان آستارا
Fig.18. Field visit to the Mordab River near agricultural land, Astara city

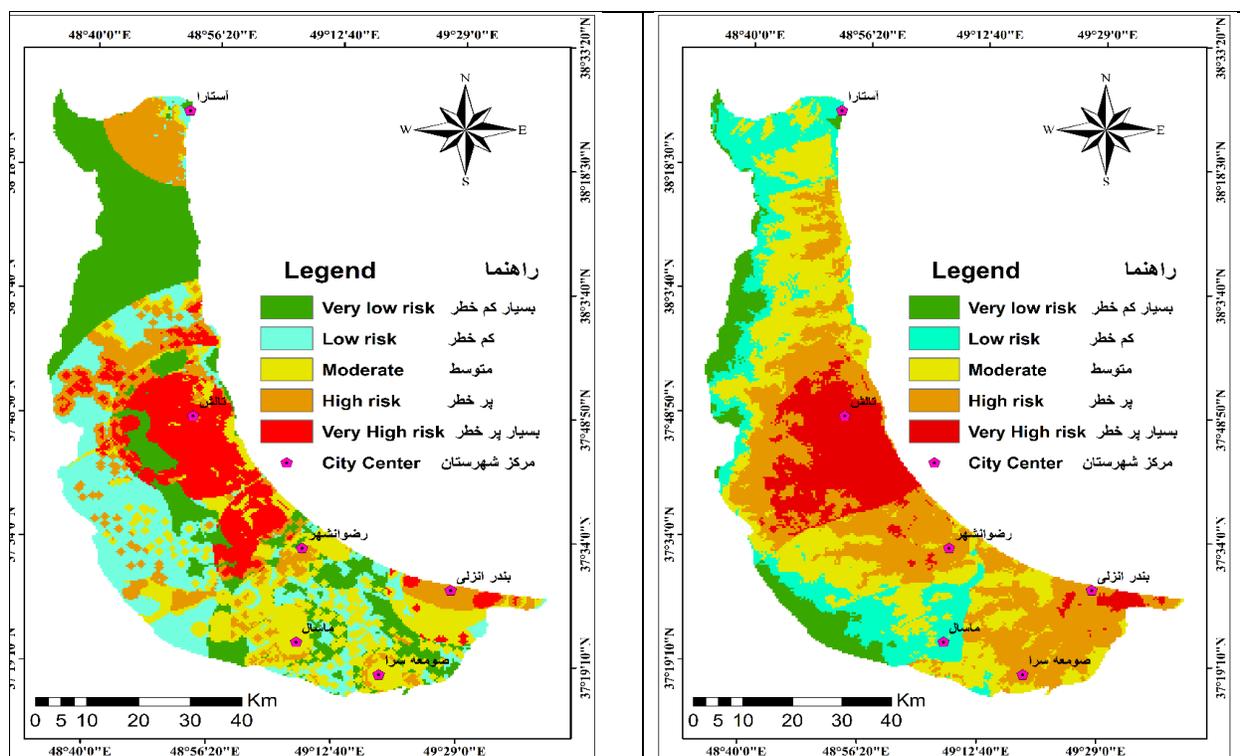
نقشه نهایی آلودگی سواحل مناطق مورد مطالعه با استفاده از مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و الگوریتم جنگل تصادفی

پهنه‌بندی آلودگی سواحل در شهرستان‌های بندر انزلی، رضوانشهر و آستارا در شمال ایران به دلیل تأثیرات محیطی و اقتصادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تلفیق تکنیک سنجش‌ازدور و GIS و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی برای برنامه‌ریزان این امکان را فراهم می‌سازد که با استفاده از توابع و تجزیه و تحلیل معیارها و رتبه‌بندی تحلیل‌ها مناسب‌ترین گزینه را که در این پژوهش پهنه‌بندی خطر آلودگی پهنه‌های ساحلی است، انتخاب نمایند. این روش با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و GIS و معیارهای وزن‌دار شده، مناطق بحرانی را شناسایی و اولویت‌بندی می‌کند.

عوامل مؤثر بر خطر آلودگی پهنه‌های ساحلی مناطق مورد بررسی با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور و ابزارهای GIS در قالب لایه‌های مختلف اطلاعاتی آماده‌سازی و بر اساس اهمیت با استفاده از مدل‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و جنگل تصادفی تلفیق و پهنه‌بندی شد و در نهایت نقشه خروجی به ۵ کلاس در پهنه‌های خطر بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی گردید. شکل ۱۹ و ۲۰ نقشه میزان آلودگی را با استفاده از روش فرآیند تحلیل مراتبی و الگوریتم جنگل تصادفی را نشان می‌دهد.

بعد از تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی میزان مساحت و درصد هر کدام از طبقات در مناطق مورد مطالعه محاسبه شد (جدول ۲). یافته‌های حاصل از نقشه‌های پهنه‌بندی آلودگی سواحل شهرستان‌های انزلی، رضوان شهر و آستارا با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی AHP و جنگل تصادفی را نشان می‌دهد که ۶/۲۰ درصد از مساحت شهرستان انزلی در کلاس خطر بسیار زیاد؛ ۰/۴۵ درصد مساحت شهرستان رضوان شهر در کلاس خطر بسیار زیاد و ۰/۵۷ درصد در کلاس خطر بسیار کم؛ ۶/۴۴ درصد مساحت شهرستان آستارا دارای خطر زیاد و ۰/۰۲ درصد دارای خطر بسیار کم می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در الگوریتم جنگل تصادفی ۹/۲۴ درصد از مساحت شهرستان انزلی دارای خطر بسیار زیاد و ۱۰/۸۲ درصد دارای خطر بسیار کم، ۱۶/۹۸ درصد مساحت شهرستان رضوان شهر دارای خطر زیاد و ۱۲/۵۵ درصد دارای خطر بسیار کم و ۱۶/۵۱ درصد مساحت شهرستان آستارا دارای خطر زیاد و ۲۶/۷۳ درصد دارای خطر بسیار کم می‌باشد. نتایج فوق نشان می‌دهد که در روش تحلیل سلسله مراتبی به دلیل اینکه متکی بر قضاوت‌های ذهنی کارشناسان است بیشتر پهنه‌های آلودگی در کلاس‌های خطر متوسط و زیاد قرار دارند به طوری که ۸۹/۷۳

درصد شهرستان انزلی به دلیل تأکید AHP بر عوامل انسانی در کلاس خطر زیاد آلودگی ساحلی قرار دارد. قابل ذکر است که معیارهای پسماندهای خانگی - صنایع آلوده ساز، زباله و تخریب و تغییر در محیط طبیعی ساحل به دلیل تمرکز گردشگران بیشترین میزان اهمیت یا وزن را داشته‌اند و از این نظر تأثیر بیشتری در نقشه پهنه‌بندی آلودگی ساحلی دارند. بر اساس نتایج به دست آمده مدل جنگل تصادفی توزیع متعادل تر خطر در تمام طبقات را داشته است. همچنین تفاوت‌های چشمگیر در نتایج دو مدل AHP و RF مستقیماً ناشی از تفاوت‌های بنیادین در روش‌شناسی این دو رویکرد است. با توجه به روش تحقیق تفاوت‌های به دست آمده در نتایج این پژوهش به ترتیب در مدل‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی AHP و جنگل تصادفی مبتنی بر محورهای روش‌شناسی (روش AHP تکیه بر نظرات کارشناسی - روش RF مبتنی بر نمونه‌های آموزشی)، داده (نظرات کارشناسی - داده‌های عینی محیطی) و حساسیت، روش AHP وابسته به دقت وزن‌دهی کارشناسی - روش RF به خطاهای فردی حساسیت کمتری دارد.



شکل ۲۰- نقشه خطر آلودگی با مدل جنگل تصادفی

Fig.20. Pollution Risk Map with Random Forest Model

شکل ۱۹- نقشه خطر آلودگی با مدل (AHP)

Fig.19. Pollution Risk Map with (AHP) Model

جدول ۲- مساحت و درصد مساحت طبقه آلودگی

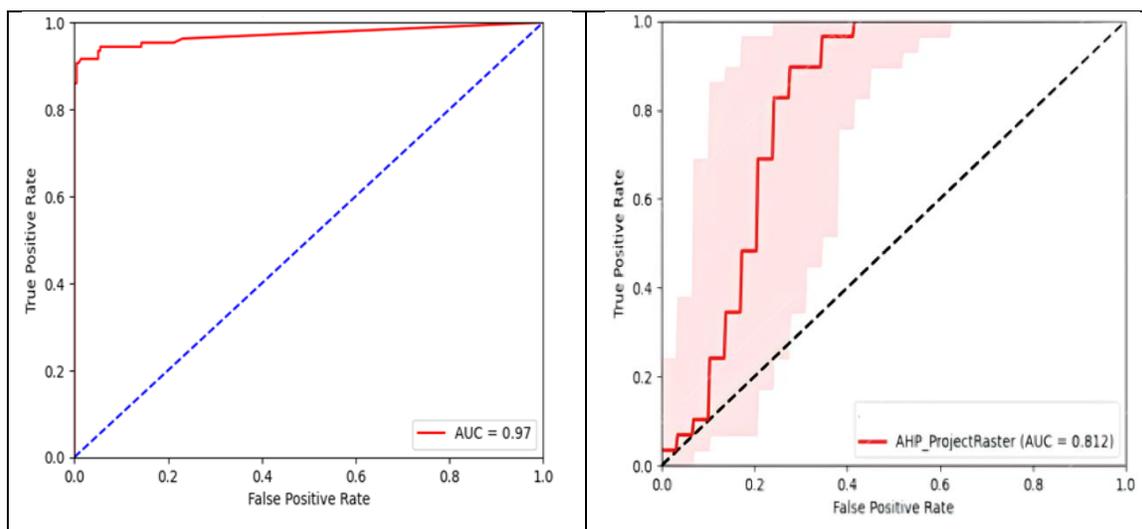
Table 2- Area and Percentage of area of Pollution Class

درصد % Percentage		مساحت (کیلومتر مربع) Area (KM ²)				طبقات Classes	مدل Model
آستارا Astara	رضوان شهر Razvanshahr	انزلی Anzali	آستارا Astara	رضوان شهر Razvanshahr	انزلی Anzali		
0/02	0/57	-	0/07	4/23	-	Very low risk	بسیار کم خطر
6/30	7/09	-	25/74	52/48	-	low risk	کم خطر
87/23	27/21	4/06	356/01	201/33	11/44	Moderate	متوسط
6/44	64/66	89/73	26/31	478/34	252/43	High risk	خطر زیاد
-	0/45	6/20	-	3/34	17/44	Very High risk	خطر بسیار زیاد
26/73	12/55	10/82	30/43	92/81	30/43	Very low risk	بسیار کم خطر
21/23	28/71	16/55	46/55	212/32	46/55	low risk	کم خطر
20/31	22/68	36/02	101/32	167/70	101/32	Moderate	متوسط
16/51	16/98	27/35	76/93	125/57	76/93		خطر زیاد
-	-	9/24	26/00	140/99	26/00		خطر بسیار زیاد

اعتبارسنجی مدل های تحلیل سلسله مراتبی و جنگل تصادفی

شکل های ۲۱ و ۲۲، نتایج ارزیابی صحت نقشه های پهنه بندی مناطق مورد مطالعه را با داده های صحت سنجی را نشان می دهد. مدل های تحلیل سلسله مراتبی و جنگل تصادفی به ترتیب ۰/۸۱۲ و ۰/۹۷ می باشد. نتایج نشان می دهد که مدل جنگل تصادفی دقت مناسبی در پهنه بندی آلودگی ساحلی دارد. از دلایل برتری دقت مدل جنگل تصادفی به تحلیل سلسله مراتبی می توان به تفاوت های بین این دو مدل اشاره کرد به طوری که روش تحلیل سلسله مراتبی متکی به وزن دهی کارشناسی می باشد و احتمال وقوع اشتباه وجود دارد و از سویی در این مدل تعامل پیچیده بین عوامل وجود دارد و همچنین ارزیابی اهمیت متغیر به کاربر متکی است، اما روش جنگل تصادفی با استفاده از روش بگینگ^۱ و ترکیب نتایج تعداد زیادی درخت تصمیم، اثر داده های پرت را کاهش می دهد و دقت مدل افزایش می یابد. همچنین مهمترین متغیرها و تعامل بین آنها را شناسایی می کند.

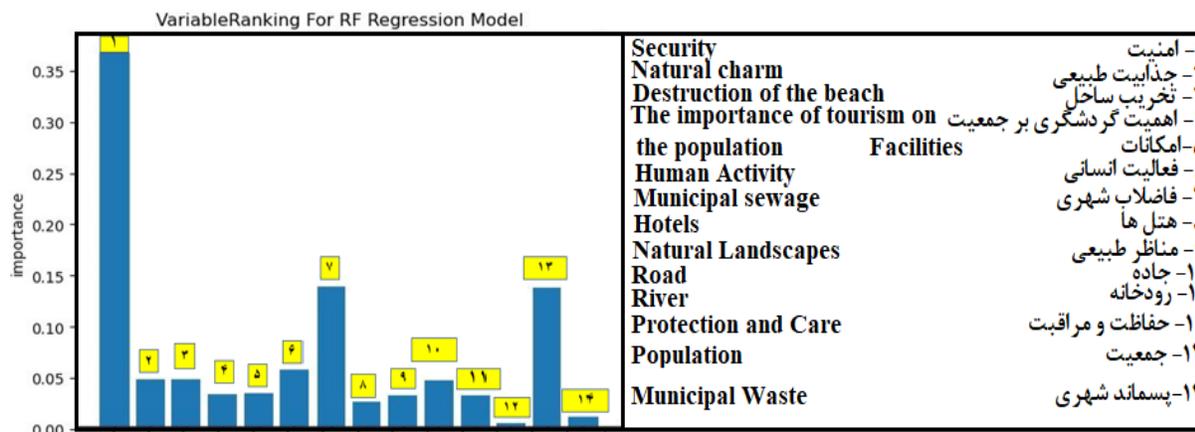
همچنین از مهمترین نتایج حاصل از مدل جنگل تصادفی می توان به اولویت بندی متغیرهای مستقل (معیارهای موثر بر آلودگی محیط زیست شهری در مناطق ساحلی اشاره کرد. براساس شکل ۲۳، معیارهای امنیت، جمعیت و فاضلاب شهری بیشترین اهمیت و معیار حفاظت و مراقبت کمترین اهمیت را در آلودگی مناطق ساحلی مورد مطالعه داشته اند.



شکل ۲۱- منحنی ارزیابی کارایی ROC مدل تحلیل سلسله مراتبی شکل ۲۲- منحنی ارزیابی کارایی ROC الگوریتم جنگل تصادفی

Fig.21. ROC Performance Evaluation Curve of the Analytic Hierarchy Model

Fig.22. ROC Performance Evaluation Curve of the Random Forest Algorithm



شکل ۲۳- اولویت بندی عوامل مؤثر در آلودگی پهنه های ساحلی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی

Fig.23. Prioritizing factors affecting coastal zone pollution using the random forest algorithm

نتیجه گیری

امروزه سواحل از مهمترین و مستعدترین اکوسیستم ها جهت رشد و توسعه تعاملات انسانی و جذب جمعیت شناخته شده اند. با افزایش جمعیت در مناطق ساحلی فعالیت های اقتصادی- اجتماعی نیز در این مناطق بیشتر می شود و از سویی رجوع گردشگران به این مناطق سبب افزایش مخاطره های زیست محیطی ساحلی خواهد شد. عدم توجه به این مخاطرات اثرات نامطلوبی را بر اکوسیستم ساحلی به جا می گذارد که بعضاً جبران آن ممکن نخواهد بود. شناخت مناطق تحت تأثیر مخاطره های زیست محیطی در مناطق ساحلی یکی از موضوعات مهم در مدیریت محیط زیست، برنامه ریزی شهری و توسعه پایدار است. در همین راستا این پژوهش به تعیین مناطق آسیب پذیر آلودگی ساحلی در شهرستان های بندرانزلی، رضوان شهر و آستارا با استفاده از مدل های AHP

و RF و تحلیل عوامل مؤثر بر آلودگی محیط زیست شهری در مناطق ساحلی پرداخته است. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که در آلودگی مناطق ساحلی معیارهای پسماندهای خانگی - صنایع آلوده‌ساز، زباله، تخریب و تغییر در محیط طبیعی ساحل به دلیل تمرکز گردشگران بیشترین میزان اهمیت را داشته‌اند همچنین در روش جنگل تصادفی معیارهای امنیت، جمعیت و فاضلاب شهری بیشترین اهمیت و معیار حفاظت و مراقبت کمترین اهمیت را در آلودگی مناطق ساحلی مورد مطالعه داشته‌اند. همچنین نتایج نشان داد که نقشه پهنه‌بندی آلودگی ساحلی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی دقت بالاتری (۰/۹۷) را نسبت به مدل تحلیل سلسله مراتبی (۰/۸۱۲) داشته است، که دلیل آن در تفاوت‌های بین دو روش می‌باشد. یافته‌های حاصل از نقشه‌های پهنه‌بندی آلودگی سواحل شهرستان‌های انزلی، رضوان‌شهر و آستارا با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و جنگل تصادفی نشان می‌دهد که ۶/۲۰ و ۲۷/۳۵ درصد از مساحت شهرستان انزلی در کلاس خطر زیاد و ۹/۲۴ درصد در کلاس بسیار زیاد قرار دارد. شهرستان بندر انزلی به دلیل جمعیت زیاد، بندر و منطقه آزاد بودن، دسترسی و فراهم بودن زیرساخت‌ها، وجود صنایع و به دلیل جذابیت‌های ساحلی، بیشترین آلودگی را داشته است. شهرستان بندرانزلی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نقاط ساحلی شمال ایران، به دلیل فعالیت‌های صنعتی و تجاری گسترده و زیر ساخت‌های مناسب گردشگری، آلودگی بیشتری نسبت به دو شهرستان رضوان‌شهر و آستارا دارد. این شهرستان به‌عنوان بندر اصلی شمال کشور، روزانه با حجم بالای تردد کشتی‌ها و ورود و خروج کالاها مواجه است. نشت مواد نفتی از کشتی‌ها و آلودگی ناشی از بارگیری و تخلیه بار، به‌شدت بر کیفیت آب و محیط‌زیست این منطقه تأثیر گذاشته است. افزون بر این، فعالیت‌های کشاورزی و تولید فاضلاب‌های خانگی نیز در بندرانزلی سبب افزایش آلودگی شده است. همچنین شهرستان رضوان‌شهر ۶۴/۶۶ و ۰/۴۵ درصد در کلاس خطر زیاد و ۱۶/۹۸ درصد در کلاس بسیار زیاد قرار دارد. سواحل رضوانشهر نیز با زباله‌های رها شده و فشار ناشی از استفاده ناپایدار از منابع طبیعی روبه‌رو هستند. این شهرستان به دلیل جاذبه‌های گردشگری متنوع‌تر، موفق به جلب بیشتر گردشگران و باعث افزایش میزان تولید فاضلاب شهری شده است و همین امر باعث تخریب سواحل می‌گردد. همچنین از سطح شهرستان آستارا ۶/۴۴ و ۱۶/۵۱ درصد در کلاس خطر زیاد قرار دارد. آستارا از نظر آلودگی وضعیت بهتری دارد. به دلیل فعالیت‌های صنعتی کمتر، وجود مناظر طبیعی و رشد و توسعه کمتر زیرساخت‌های گردشگری، آلودگی در این شهرستان به مراتب کمتر از رضوان‌شهر و بندر انزلی است. به‌طور کلی، این سه شهرستان به علت تفاوت‌های مشغله‌های صنعتی، جذب گردشگر و مدیریت پسماند، شاهد سطوح مختلف آلودگی هستند. حکیمی و خانجانی (Hakimi & Khanjani, 2014) در پژوهشی اثرات زیست محیطی گردشگری را بر نوار ساحلی استان گیلان با استفاده از نرم افزار GIS بررسی کردند. محققین بیان نمودند که گردشگری در نوار ساحلی اگرچه سبب رشد اقتصادی منطقه می‌شود اما با این وجود به دلیل عدم توجه مسئولین به حفظ محیط زیست و پایین بودن سطح آگاهی گردشگران و ساکنین بومی در این زمینه باعث بروز آلودگی‌های مختلفی مانند آلودگی آب، آلودگی بصری، آلودگی صوتی، آلودگی هوا و کاهش گونه‌های آبی خواهد شد. زاکری مینابی و همکاران (Zakeri & Minabi, Zarei & Derakhshan, 2024) در پژوهشی به شناسایی و سطح‌بندی تهدید آلودگی مناطق حساس ساحلی در شرق تنگه هرمز (محدوده مورد مطالعه: شهرستان سیریک) پرداختند. محققین بیان نمودند که در محدوده ساحلی شهرستان سیریک، آلودگی‌های ایجاد شده پهنه وسیعی از این سواحل را در حالت تهدید قرار داده است. بنابراین شناخت عوامل تهدید آلودگی می‌تواند در مدیریت مناطق ساحلی مؤثر باشد. با توجه به مطالب گفته شده نتایج این پژوهش با نتایج محققین دیگر مبنی بر آلوده شدن سواحل کشور مطابقت دارد. داور و همکاران (Davar, Azizi Jalilian, Rafiei & Danehkar, 2014) نیز در پژوهشی بیان داشتند که جنوب شرقی خلیج چابهار تا امتداد آن به سمت شرق مهم‌ترین پهنه آسیب‌پذیری ساحلی است. به صورت کلی نتایج پژوهش نشان می‌دهد که ارتباط زیادی بین گردشگری و آلودگی محیط زیست وجود دارد. به همین دلیل، جهت حفظ محیط زیست و همسو شدن با توسعه و گردشگری پایدار نیاز است برنامه‌های اجرایی در مناطق گردشگرپذیر انجام شود.

References

- Abirami, A. (2024). Marine pollution and waste management, Law and legal research development. *Journal of Law and Legal Research Development*, 1(2), 20-24. <https://doi.org/10.69662/jllrd.v1i2.10>
- Arabadzhyan, A., Figini, P., García, C., González, M. M., Lam-González, Y. E., & León, C. J. (2021). Climate change, coastal tourism, and impact chains—a literature review. *Current Issues in Tourism*, 24(16), 2233-2268. <https://doi.org/10.1080/13683500.2020.1825351>
- Bancal, N. (2017). Industrial Development and Challenges of Water Pollution in Coastal Areas: The Case of Surat, India. OP conference series Earth and Environmental science, 120, (012001). <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/120/1/012001>
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Chen, W., Li, y., Xue, W., Shahabi, H., Li, S., & Hong, H. (2020). Modeling flood susceptibility using data-driven approaches of naïve Bayes tree, alternating decision tree and random forest methods. *Science of the Total Environment*. 701, 134979. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134979>
- Darvishi, R., Rezaei, M. R., & Shams-Aldini, A. (2018). Investigating the role of coastal tourism in economic development from the perspective of citizens. *Quarterly Scientific-Research Journal of Geography (Regional Planning)*, 8(4), 411-426. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286462.1397.8.4.24.7>
- Davar, L., Azizi Jalilian, M., Rafiei, R., & Danehkar, A. (2014). Vulnerability zoning of the coastal strip of Sistan and Baluchestan province based on threat foci. *Journal of Natural Environment*, 67(3), 289-300. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jne.2014.52728>
- Ebrahimi, M., & Ramezanipour, M. (2018). Measuring the level of environmental responsibility of tourists. *Geography and Human Relations*, 1(2), 835-849. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26453851.1397.1.2.52.5>
- Fathalipour, M. (2023). Investigation of water polluting sources on the southern coast of the Caspian Sea in Gilan Province. Paper presented at the Proceedings of the 3th International Conference on New Technologies in Science, Amol, 3-4. [In Persian] <https://civilica.com/doc/1753787>
- Garcés-Ordóñez, O., Díaz, L. F. E., Cardoso, R. P., & Muniz, M. C. (2020). The impact of tourism on marine litter pollution on Santa Marta beaches, Colombian Caribbean. *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111558. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111558>
- Ghosh, T. (2011). Coastal tourism: opportunity and sustainability. *Journal of Sustainable Developmen*, 4(6), 67. <https://doi.org/10.5539/jsd.v4n6p67>
- Haji Amiri, R., Asghari, H., Amar, T., & Poursheykhian, A. (2023). Necessity of analysis of solid municipal wastes from origin to destination with emphasis on Astara city (West of Gilan province). *Geographical Engineering of Territory*, 7(2), 477-494. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.25381490.1402.7.2.17.3>
- Hakimi, F., & Khanjani, F. (2014). Environmental impacts of tourism on the coastal strip of Gilan using software GIS. Paper presented at the Proceedings of the 2th National Conference on Tourism, Geography and Sustainable Environment. [In Persian] <https://civilica.com/doc/329164>
- Janparvar, M., Taghizadeh Sarokalaei, A., & Mazloom, Z. (2016). Politics, Technology and Environment (A Different Perspective on Environmental Issues in Guilan). Paper presented at the Proceedings of the Conference on Land Planning, the Position of the Caspian Sea and the Development Prospects of Gilan. [In Persian] <https://civilica.com/doc/584777>
- Jorgensen, B., Krasny, M., & Baztan, J. (2021) Volunteer beach cleanups: civic Environmental stewardship combating global plastic pollution. *Sustainability Science*, 16(1), 153-167. <https://hal.science/hal-02919775v1>
- Kabil, M., Priatmoko, S., Magda, R., & Denes-david, L. (2021). Blue Economy and Coastal Tourism: A Comprehensive Visualization Bibliometric Analysis. *Sustainability*, 13(7), 3650. <https://doi.org/10.3390/su13073650>

- Karnejadi, A., Ownegh, M., Pourghasemi, H., Bahremand, A., & Motamedi, M. (2019). Landslide susceptibility prediction using combined Mahalanobis distance and machine learning models (Case study: Oghan watershed, Golestan province). *Earth Science Research*, 11(42), 1-18. [In Persian] <https://doi.org/10.52547/esrj.11.2.1>
- Lasaiba, M. (2024). Mitigation of Waste Pollution in Coastal Ecosystems and Mangrove Forests in Coastal Areas. *Jurnal Pengabdian Arumbai*, 2(1), 1-13. <https://doi.org/10.30598/arumbai.vol2.iss1.pp1-13>
- Maghsoudi, M., Mohammad Khan, Sh., & Gholami, F. (2023). The role of natural factors in the settlement of ancient sites in the Payab basin of Seymareh 2 using the AHP model. *Physical Geography*, 16(62), 1-15. [In Persian] https://journals.iau.ir/article_709111.html
- Movahedi, S., & Rostami, A. (2021). Investigating the potential for the development of cross-border cultural tourism in Guilan Province. *Journal of Urban Studies on Space and Place*, 4(14). [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.25386050.1399.1399.14.2.6>
- Pourshikhian, A., Amar, T., & Ebrahimi, S. A. (2012). Analysis on the topology criteria for hygienic curative centers in Anzali Port city. *Journal of Studies of Human Settlements Planning*, 21(7), 88-100. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.25385968.1391.7.21.8.8>
- Salari Sardari, F. A., Arabzadeh, S., Teymuri, S., & Jam, M. (2016). Analysis and Evaluation of the Role of Human Activities in the Persian Gulf. *Persian Gulf Studies*, 2(2), 65-77. [In Persian] https://persiangulf.iranology.ir/file/65_25_full.pdf
- Salehi, S., Ghadami, M., & Hemmati Gouyomi, Z. (2012). A study of Environmental Behaviors among Coastal Tourists (A case Study of Coastal Tourists in Bushehr City during New Year Holiday). *Journal of Tourism Planning and Development*, 1(1), 35-58. [In Persian] https://tourismpd.journals.umz.ac.ir/article_295.html
- Yaghoubzadeh, M., Danekar, A., Haghigat, M., Mashhadi Rafiee, M., & Lotfikhah, S. (2022). Coastal Zoning of Sistan and Baluchestan Base on Environmental Sensitivity. *Journal of Natural Environment*, 75(1), 49-63. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jne.2022.336323.2360>
- Zakeri Minabi, E., Zarei, M., & Derakhshan, A. (2024). Identification and leveling of pollution threat in sensitive coastal areas in the east of the Strait of Hormuz (Study area: Sirik County). *Journal of Marine Medicine*, 6(3), 185-193. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.30491/6.3.185>
- Ziari, K., Rezvani, M. R., & Ferdowsi, S. (2020). Determination of Physical-Ecological Carrying Capacity of Coastal Tourism and its Effectiveness of Satisfaction of Tourists (Case Study: Bandar Gaz). *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(6), 189-202. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.22034/JEST.2019.24324.3332>



Landfill Suitability Site Selection Using Environmental Parameters and Exclusion Zones (Case Study: Dalahu County)

Saied Asadollah Hejazi¹, Zahra Zanganeh Tabar²

¹ Associate Professor in Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran

² Ph.D. Student in Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 13 May 2025

Revised: 08 July 2025

Accepted: 07 August 2025

Available Online: 08 August 2025

Keywords:

Landfill Site Selection

GIS and Remote Sensing

MCDM

MSW

Dalaho County

ABSTRACT

One of the main contributors to environmental pollution and degradation is household and industrial waste. Therefore, the proper siting of landfill facilities plays a crucial role in controlling and reducing such pollution. Given the importance of this issue, the present study focuses on identifying suitable areas for landfill development in Dalaho County, Kermanshah Province. The research utilizes remote sensing techniques and multi-criteria decision-making (MCDM) methods. Key datasets used include MODIS, CHIRPS, Google Earth satellite imagery, 1:100,000-scale geological maps, and a 30-meter digital elevation model (DEM). The study employed various software tools, including ArcGIS, IDRISI, Super Decisions, and Google Earth Engine. Ten criteria were considered in the analysis: lithological features, distance from faults, elevation, slope, vegetation density, average annual rainfall, and distance from rivers, main roads, urban areas, and rural areas. The Analytic Network Process (ANP) was used for weighting the parameters, and the Weighted Linear Combination (WLC) method was applied to integrate the data layers. The results show that approximately 48% of Dalaho County has a high potential for pollution and environmental degradation, indicating that landfill sites should be located away from these areas. Conversely, around 31% of the area has low suitability for landfill development. Ultimately, only a small portion of the region about 8%, demonstrates moderate potential for landfill siting based on the evaluated criteria.

* Corresponding author: Dr. Saied Asadollah Hejazi

E-mail address: S.hejazi@tabrizu.ac.ir

How to cite this article: Hejazi, S. A., & Zanganeh Tabar, Z. (2025). Identifying Areas Prone to Landfilling based on Environmental Parameters and Implementing Prohibited Areas (Case Study: Dalaho County). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 235-251. <https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.93006.1564>



©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 increasing trend of waste generation in recent years has emerged as a significant challenge for urban planners and environmentalists. Waste is one of the main contributors to environmental pollution and degradation, as well as to the spread of various diseases. Therefore, proper planning for waste management and disposal is critically important. One of the key measures in controlling pollution from waste is the appropriate siting of landfill facilities. Site selection based on environmental capabilities is a fundamental principle of urban and regional development planning. Identifying suitable areas for waste disposal plays a crucial role in mitigating environmental pollution and degradation. Different regions possess varying potentials for environmental planning due to their geomorphological, geological, and hydroclimatic conditions. Some areas, influenced by these factors, face significant constraints in accommodating activities such as landfill establishment. Dalaho County, located in Kermanshah Province within the folded Zagros structural zone, is one such region. Due to its geological and climatic characteristics, it contains substantial surface and groundwater resources. Moreover, tectonic activity, numerous faults and fractures, and permeable lithological formations make groundwater highly susceptible to contamination. This highlights the importance of accurately identifying suitable areas for landfill siting in the region. Accordingly, this study aims to determine potential landfill sites in Dalaho County.

Material and Methods

This study employed remote sensing methods to identify areas suitable for landfill siting in Dalaho County using ten key parameters: lithology, distance from faults, elevation, slope, vegetation density, average annual rainfall, distance from rivers, main roads, urban areas, and rural areas. To prepare lithology and fault maps, 1:100,000-scale digital geological maps from the National Geological Organization were used, while a 30-meter SRTM digital elevation model provided data on elevation, slope, and river networks. Google Earth Engine, along with MODIS and CHIRPS satellite imagery, was employed to generate maps of vegetation density and annual precipitation, and Google Earth images were used to identify urban areas and main roads. The analysis utilized several software tools, including ArcGIS (for fuzzification of data layers and map generation), Google Earth Engine (for vegetation and rainfall mapping), IDRISI (for implementing the Weighted Linear Combination, or WLC, model), and Super Decisions (for applying the Analytic Network Process, or ANP). The research was conducted in multiple stages: first, data layers were prepared and standardized (fuzzified); second, the layers were weighted using the ANP model; and finally, the integrated WLC-ANP model was applied to identify landfill-susceptible areas in Dalaho County.

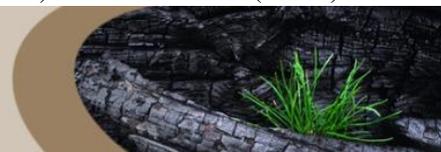
Discussion and Results

Certain areas in the region possess high environmental and ecological value or are highly vulnerable to pollution, necessitating their exclusion from landfill siting. Therefore, based on environmental status, a literature review, and expert consultation, a restricted areas map was developed. This included buffer zones around rivers, urban areas, Azadi Dam Lake, faults, and regions with dense vegetation. The analysis showed that large portions of Dalaho County are unsuitable for waste disposal due to lithological, topographical, and hydrological constraints. In general, the eastern and southern parts of the county showed relatively higher potential for landfill development, whereas the central, western, and northern areas faced more significant limitations.

Conclusion

The natural characteristics of Dalaho County render it highly vulnerable to environmental pollution, making landfill site selection particularly sensitive. This study applied an integrated WLC-ANP model to identify areas suitable for landfilling. Results indicate that approximately 48% of the county, comprising areas within 500 meters of rivers, 1 km from fault lines, 3 km from urban centers, 2 km from Azadi Dam Lake, and regions with dense vegetation, is highly susceptible to pollution and should be excluded from landfill development. About 31% of the area, primarily located in the western and northern regions, was

classified as having low to very low suitability for landfill siting due to factors such as steep slopes, high elevations, fault proximity, and unsuitable lithology. Only around 8% of the county, located mainly in the eastern and southern regions, showed moderate potential for landfill establishment. Overall, the study emphasizes that Dalaho County's natural setting, particularly its hydrogeomorphological features, must be carefully considered when planning waste disposal facilities. Proper site selection can play a vital role in preventing environmental degradation and protecting groundwater resources.



شناسایی مناطق مستعد دفن زباله براساس پارامترهای محیطی و اعمال مناطق ممنوعه (مطالعه موردی: شهرستان دالاهو)

سید اسداله حجازی^{۱*}، زهرا زنگنه تبار^۲

^{۱*}دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۲دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
یکی از عوامل اصلی آلودگی و تخریب محیط زیست، زباله‌ها و پسماندهای خانگی و صنعتی هستند، بنابراین مکان‌یابی صحیح سایت‌های دفن زباله می‌تواند نقش مهمی در کنترل و یا کاهش این آلودگی‌ها داشته باشد. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به شناسایی مناطق مستعد دفن زباله در شهرستان دالاهو در استان کرمانشاه پرداخته شده است. این تحقیق با بهره‌گیری از روش‌های سنجش از دوری و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام شده است. مهم‌ترین داده‌های مورد استفاده شامل تصاویر ماهواره‌های MODIS، CHIRPS و گوگل ارث، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۰۰۰۰۰ و مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر بوده است. در این تحقیق از نرم‌افزارهای IDRISI، ArcGIS، Super Decisions و سامانه گوگل ارث انجین استفاده شده است. همچنین در این تحقیق از ۱۰ پارامتر لیتولوژی، فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، تراکم پوشش گیاهی، میانگین بارش سالانه، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده اصلی، فاصله از نقاط شهری و فاصله از نقاط روستایی و مدل‌های ANP (به منظور وزن‌دهی به پارامترها) و WLC (به منظور ترکیب لایه‌های اطلاعاتی) به منظور شناسایی مناطق مستعد دفن زباله استفاده شده است. بر اساس نتایج حاصله، حدود ۴۸ درصد از وسعت شهرستان دالاهو پتانسیل آلودگی و تخریب محیط زیست بالایی دارند، بنابراین سایت‌های دفن زباله باید به دور از این مناطق باشد. حدود ۳۱ درصد از محدوده مطالعاتی نیز پتانسیل کمی جهت ایجاد سایت دفن زباله دارند. با توجه به موارد ذکر شده، تنها بخش کمی از شهرستان دالاهو که حدود ۸ درصد از وسعت آن محسوب می‌شود از نظر پارامترهای مورد استفاده دارای پتانسیل نسبی جهت ایجاد سایت‌های دفن زباله است.	<p>تاریخچه مقاله:</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۶</p> <p>کلمات کلیدی:</p> <p>انتخاب محل دفن زباله سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) سنجش از دور پسماند جامد شهری (MSW) شهرستان دالاهو</p>

مقدمه

در طی سال‌های اخیر به موازات روند افزایشی جمعیت و توسعه نواحی سکونتگاهی، تأثیر فعالیت‌های انسانی بر تغییرات محیطی نیز افزایش یافته است (Hejazi, 2016; Negahban, Ganjaeian, Feraydooni Kordestani & Cheshmeh Sefidi, 2019; Negahban, Ganjaeian, Ebrahimi & Emami, 2019; Mohammakhhan, Ganjaeian, Shahri & Abbaszade, 2019; Salari, Nayyeri, Ganjaeian & Amani, 2020). تغییرات محیطی ناشی از فعالیت‌های انسانی به صورت‌های مختلف از جمله تغییرات کاربری اراضی (Li, 2019; Liang et al., 2025; Mainul, Ajim & Ateeque, 2020)، تخریب پوشش گیاهی، آلودگی محیطی و غیره بوده است. از جمله عوامل مهمی که باعث آلودگی و در نتیجه تخریب محیط زیست می‌شود، زباله‌ها و پسمانده‌های مختلف مناطق شهری و روستایی هستند (Liang et al., 2025; Mainul, Ajim & Ateeque, 2020).

روند افزایشی تولید زباله در طی سال‌های اخیر به عنوان یکی از چالش‌های مهم برنامه‌ریزان شهری و حامیان محیط زیست مطرح شده است (Alkaradaghi, Salahuddin, Al-Ansari, Laue & Chabuk, 2019; Wu, Chen, Huang & Yu, 2025). بر اساس آمار ارائه شده از سوی سازمان بهداشت جهانی، سرانه تولید زباله در سال از ۰/۶۴ کیلوگرم به ازای هر نفر در روز به ۱/۲ کیلوگرم افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌شود که روند تولید سالانه زباله از ۱/۳ میلیارد تن به ۲/۲ میلیارد تن در سال ۲۰۲۵ افزایش یابد (Soltani, 2015; Hewage, Reza & Sadiq, 2015). با توجه به اینکه زباله‌ها از عوامل اصلی آلودگی و تخریب محیط و همچنین شیوع بیماری‌های مختلف محسوب می‌شوند (Aghsaei & Souri, 2017)، بنابراین برنامه‌ریزی به منظور کنترل و دفن مناسب زباله‌ها بسیار حائز اهمیت است (Emadodin, Farzaneh, Arekhi & Sayyad Salar, 2020). یکی از مهم‌ترین اقداماتی که در زمینه کنترل آلودگی ناشی از زباله‌ها صورت می‌گیرد، دفن زباله‌ها در مکان‌های مناسب است (Roy, Das, Paul & Pau, 2022). در واقع، مکان‌یابی بر مبنای توانمندی‌های محیطی، یکی از اصول اساسی برنامه‌ریزی‌های شهری و عمرانی است (Nayyeri, Ganjaeian & Amani, 2018) و مکان‌یابی صحیح و شناسایی مناطق مستعد دفن زباله از جمله مهم‌ترین راهکارهای کنترل آلودگی و تخریب محیط زیست محسوب می‌شود (Mallick, 2021).

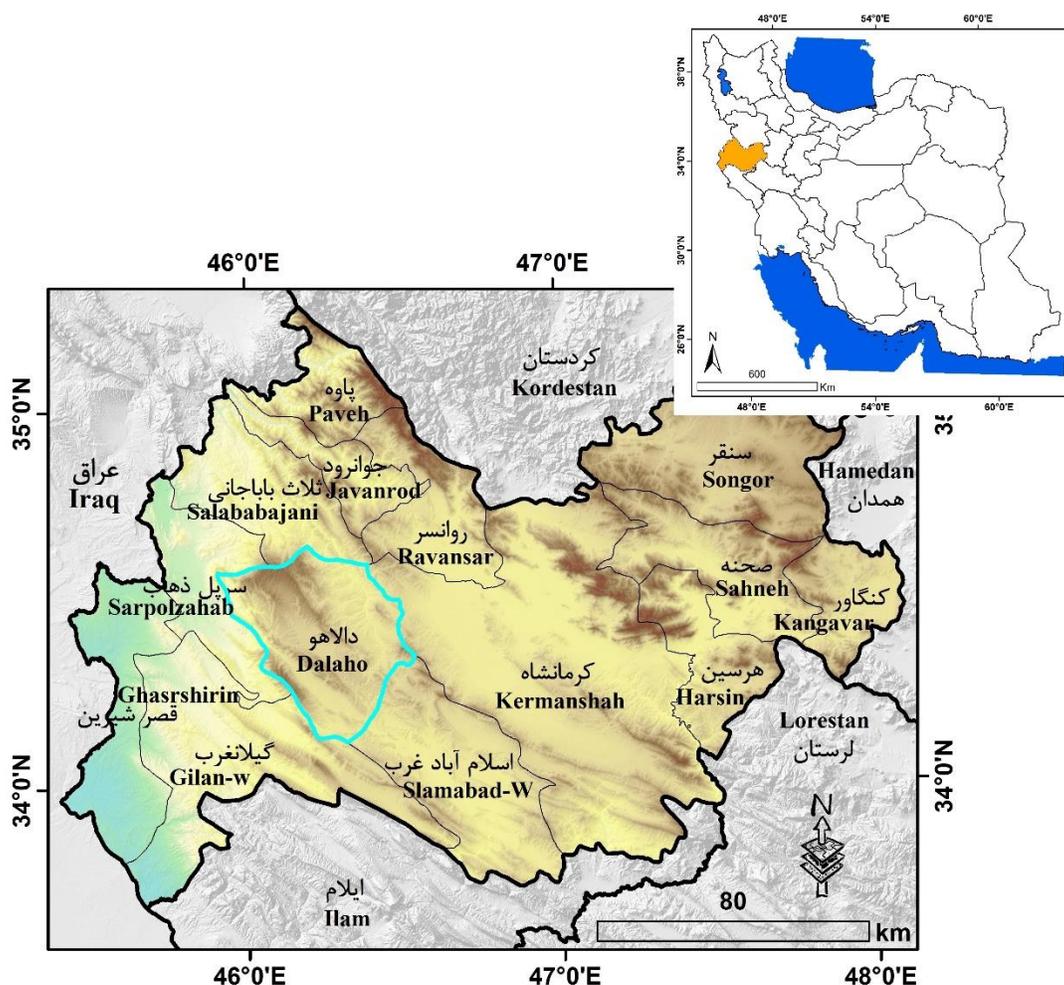
مناطق مختلف با توجه به وضعیت ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی و هیدرواقليمی، پتانسیل‌های مختلفی جهت انجام برنامه‌ریزی‌های محیطی دارند (Nayyeri, Salari, Ganjaeian & Amani, 2017; Salari, Nayeri, Amani & Ganjaeian, 2017). بعضی از مناطق هستند که تحت تأثیر عوامل ذکر شده، محدودیت‌های زیادی جهت فعالیت‌های مختلف از جمله ایجاد سایت‌های دفن زباله دارند. از جمله مناطقی که دارای محدودیت‌های زیادی در این زمینه است، شهرستان دالاهو در استان کرمانشاه است. شهرستان دالاهو در واحد زاگرس چین‌خورده قرار دارد و با توجه به وضعیت زمین‌شناسی و اقلیمی، دارای منابع آب سطحی و زیرزمینی قابل توجهی است (Ganjaeian, 2020) و همچنین با توجه به تکتونیزه بودن منطقه و داشتن درز و شکاف‌های فراوان (Ganjaeian, Yamani, 2023) و لیتولوژی نفوذپذیر، منابع آب زیرزمینی آن پتانسیل آلودگی بالایی دارد و همین مسئله سبب شده است تا شناسایی مناطق مستعد دفن زباله در این شهرستان بسیار حائز اهمیت باشد. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به شناسایی مناطق مستعد دفن زباله در شهرستان دالاهو پرداخته شده است.

اهمیت موضوع مورد مطالعه سبب شده است تا در ارتباط با آن تحقیقات مختلفی صورت گیرد که از جمله آن‌ها می‌توان به چانگ و همکاران (Chang, Parvathinathan & Breeden, 2008) اشاره کرد که با استفاده از منطق فازی به شناسایی مناطق مستعد دفن زباله در جنوب تگراس پرداختند و نشان دادند که محدوده مطالعاتی پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی در برابر آلودگی دارد. برکت و همکاران (Barakat, Hilali, El Baghdadi & Touhami, 2017) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش AHP نشان دادند که تنها ۱۰ درصد از شهر بنی ملال مراکش مناسب برای دفن زباله است. سلیکر و همکاران (Celiker, Yıldız & Koçer, 2019) با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و سیستم اطلاعات جغرافیایی که حدود ۴۶ درصد از محدوده حاشیه شهر الازیک ترکیه

مناسب برای دفن زباله است. هررا و همکاران (Hereher, Al-Awadhi & Mansour, 2020) با استفاده از روش‌های وزن‌دهی و پهنه‌بندی نشان دادند که تنها ۲ درصد از شهر مسقط عمان مناسب برای دفن زباله است. میتاب و همکاران (Mitab, Hamdoon & Say, 2023) با استفاده از پارامترهای طبیعی و انسانی و مدل AHP نشان دادند که بخش زیادی از منطقه کرکوک عراق مناسب برای دفن زباله نیست. عباس‌نژاد و همکاران (Abbasnezhad, Yarmoradi & Sarafrozeh, 2017) به مکان‌یابی دفن زباله در شهرستان ماکو به روش فازی و بولین پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داده است که مناطق شمال شرقی شهرستان ماکو پتانسیل بیش‌تری جهت دفن زباله دارند. نیک‌زاد و همکاران (Nikzada, Amiri, Moarab & Foroughi, 2017) با استفاده از مدل‌های ANP و منطق فازی نشان دادند که تنها بخش کمی از مناطق جنوبی شهرستان علی‌آباد، مناسب برای دفن زباله است. دهقانی قناتغستانی و جوادی‌زاده (Dehghani Ghantghastani & Javadizadeh, 2021) با استفاده از روش AHP و منطق فازی نشان دادند که حدود ۲ درصد از محدوده شهری سیریک هرمزگان مناسب برای دفن زباله است. باقرآبادی (Bagherabadi, 2022) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی نشان داده است که حدود ۵/۶ درصد از وسعت شهرستان صحنه، مناسب برای دفن زباله است. رضاپور و دیمه‌ور (Rezapour & Deymevar, 2024) با استفاده از منطق فازی و سیستم اطلاعاتی جغرافیایی نشان دادند که ۸۸ درصد از محدوده شهرستان بیرجند، مناسب برای دفن زباله نیست. در راستای تحقیقات پیشین، هدف از این تحقیق شناسایی مناطق مستعد دفن زباله در شهرستان دالاهو است. در این تحقیق بر خلاف تحقیقات پیشین، علاوه بر استفاده از پارامترهای مختلف طبیعی و انسانی، لایه مناطق ممنوعه نیز تهیه و اعمال شده است.

منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق شهرستان دالاهو به‌عنوان محدوده مطالعاتی انتخاب شده است. شهرستان دالاهو از نظر تقسیمات سیاسی در محدوده استان کرمانشاه قرار دارد و از اطراف به شهرستان‌های ثلاث باباجانی، کرمانشاه، اسلام‌آباد غرب، گیلانغرب و سرپل ذهاب منتهی می‌شود (شکل ۱). این شهرستان با وسعت ۱۸۷۶ کیلومترمربع، ۳۵۹۸۷ نفر جمعیت دارد. شهرستان دالاهو از نظر تقسیمات مورفوتکتونیکي جزء واحد زاگرس چین‌خورده محسوب می‌شود. این شهرستان از نظر ارتفاعی در بین ارتفاع ۶۵۳ تا ۲۵۳۴ متری از سطح دریا قرار دارد و با توجه به اختلاف ارتفاع زیادی که دارد، بخش زیادی از وسعت آن را مناطق کوهستانی و دامنه‌های پرشیب در بر گرفته است. از نظر اقلیمی نیز این شهرستان با میانگین بارش سالانه ۵۲۰ میلی‌متر، دارای زمستان‌های سرد و خشک و تابستان‌های معتدل است.



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig.1. Location map of the study area

مواد و روش‌ها

داده‌های تحقیق

در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌های MODIS و CHIRPS، مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر SRTM و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه به‌عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. در این تحقیق به منظور شناسایی مناطق مستعد دفن زباله در شهرستان دالاهو، از ۱۰ پارامتر لیتولوژی، فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، تراکم پوشش گیاهی، میانگین بارش سالانه، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده اصلی، فاصله از نقاط شهری و فاصله از نقاط روستایی استفاده شده است. به‌منظور تهیه نقشه لیتولوژی و گسل‌های منطقه از لایه رقومی نقش زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور استفاده شده است. به‌منظور تهیه نقشه ارتفاع، شیب و رودخانه‌های منطقه، از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر SRTM استفاده شده است. با توجه به کاربرد سامانه گوگل ارث انجین در مطالعات اقلیمی و بررسی پوشش زمین (Negahban, Ganjaeian, Ebrahimi & Gheysarian, 2025; Safari Namivandi,)، از این سامانه و تصاویر ماهواره‌های MODIS و CHIRPS به ترتیب به‌منظور تهیه

نقشه‌های تراکم پوشش گیاهی و میانگین بارش سالانه استفاده شده است. همچنین به منظور تهیه نقشه نقاط شهری و جاده‌های اصلی منطقه، از تصاویر گوگل ارث استفاده شده است.

ابزارهای تحقیق

در این تحقیق از ابزارهای مختلفی استفاده شده است که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: ArcGIS (به منظور فازی‌سازی لایه‌های اطلاعاتی و تهیه نقشه‌های خروجی)، سامانه گوگل ارث انجین (به منظور تهیه نقشه‌های تراکم پوشش گیاهی و میانگین بارش سالانه)، IDRISI (به منظور ترکیب لایه‌های اطلاعاتی و تهیه نقشه پهنه‌بندی مناطق مستعد دفن زباله با استفاده از مدل WLC) و SuperDecisions (به منظور وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از مدل ANP) بوده است.

مراحل تجزیه و تحلیل اطلاعات

با توجه به موضوع و اهداف مورد نظر، این تحقیق به صورت کلی در چند مرحله انجام شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:

مرحله اول (استانداردسازی پارامترها): پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر پارامتر، به منظور قابل ارزیابی کردن آن‌ها، لایه‌های اطلاعاتی استانداردسازی (فازی‌سازی) شده‌اند. در واقع به هر لایه بر مبنای پتانسیلی که به منظور دفن زباله دارد، ارزش دورن لایه‌ای بین صفر تا ۱ داده شده است (جدول ۱).

جدول ۱- نحوه استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی

Table 1- Standardization method of information layers

ارزش درون لایه‌ای Intra-layer value	پارامتر Parameter	شاخص Index	ردیف Row
مناطق با لیتولوژی نفوذناپذیر، پتانسیل بیشتری جهت دفن زباله دارند. Areas with impermeable lithology have greater potential for landfilling.	لیتولوژی Lithology	زمین‌شناسی Geology	1
مناطق دور از خطوط گسل، پتانسیل بیشتری جهت دفن زباله دارند. Areas away from fault lines have greater potential for landfilling.	گسل Fault		2
مناطق کم ارتفاع، پتانسیل بیشتری جهت دفن زباله دارند. Low elevation areas have more potential landfilling.	ارتفاع Elevation	توپوگرافی Topography	3
مناطق کم شیب، پتانسیل بیشتری جهت دفن زباله دارند. Low slope areas have more potential landfilling.	شیب Slope		4
مناطق دور از رودخانه، پتانسیل بیشتری جهت دفن زباله دارند. Areas away from river have greater potential for landfilling.	رودخانه River	هیدرولوژی Hydrology	5
مناطق با بارش کم‌تر، پتانسیل بیشتری جهت دفن زباله دارند. Areas with low rainfall have greater potential for landfilling.	بارش Precipitation		6
مناطق با پوشش گیاهی کم تراکم‌تر، پتانسیل بیشتری جهت دفن زباله دارند. Areas with less dense vegetation cover have greater potential for landfilling.	پوشش گیاهی Vegetation	پوشش زمین Land cover	7
مناطق دور از نقاط شهری، پتانسیل بیشتری جهت دفن زباله دارند. Areas away from city have greater potential for landfilling.	نقاط شهری City		8
مناطق دور از نقاط روستایی، پتانسیل بیشتری جهت دفن زباله دارند. Areas away from village have greater potential for landfilling.	نقاط روستایی Village	انسانی Human	9
مناطق دور از جاده، پتانسیل بیشتری جهت دفن زباله دارند. Areas away from road have greater potential for landfilling.	جاده اصلی Main Road		10

مرحله دوم (وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی): با توجه به اینکه ارزش و اهمیت لایه‌های اطلاعاتی یکسان نیست، در این پژوهش با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای (ANP)، به لایه‌های اطلاعاتی وزن داده شده است. در این مرحله پس از تشکیل ساختاری شبکه‌ای معیارها، با توجه به رابطه درونی و بیرونی معیارها، از ماتریس مقایسه‌ای شامل ۱۰ سطر و ۱۰ ستون برای تعیین رابطه و میزان اهمیت هر یک از این معیارها و زیرمعیارها استفاده شده است. برای انجام محاسبات از نرم‌افزار Super Decisions استفاده شده و در نهایت با استفاده از نظرات کارشناسان، وزن معیارهای مورد نظر محاسبه شده است.

مرحله سوم (اجرای مدل WLC¹): پس از وزن‌دهی و اعمال وزن به‌دست آمده بر روی هر لایه، لایه‌های اطلاعاتی وارد نرم‌افزار IDRISI شده است و در نهایت با استفاده از مدل ترکیب خطی وزنی (WLC)، لایه‌های اطلاعاتی با هم ترکیب شده و نقشه نهایی مناطق مستعد دفن زباله در شهرستان دالاهو تهیه شده است.

روش WLC یکی از رایج‌ترین تکنیک‌های ارزیابی چند معیاره محسوب می‌شود که روش وزن‌دهی جمع‌پذیر و یا روش امتیازدهی نیز نامیده می‌شود (Tabesh, Noori Khanyourdi, Dousti & Ganjaeain, 2020; Ganjaeian, Rezaei Arefi, Peysoozi, Emami, 2021). اساس این روش بر مبنای میانگین وزنی است و تصمیم‌گیرنده‌ها مستقیماً بر مبنای اهمیت نسبی معیارها، وزن‌هایی به آن‌ها می‌دهد، سپس با ضرب وزن نسبی در مقدار آن معیار، یک وزن نهایی برای آن معیار به دست می‌آید. پس از به‌دست آمدن وزن نهایی گزینه‌ها، گزینه‌ای که بیش‌ترین مقدار را داشته باشد، مناسب‌ترین گزینه برای هدف مورد نظر خواهد بود (Ganjaeian, 2020).

نتایج و بحث

تشریح پارامترهای مورد استفاده

در این پژوهش به منظور شناسایی مناطق مستعد دفن زباله در شهرستان دالاهو از ۱۰ پارامتر طبیعی و انسانی استفاده شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:

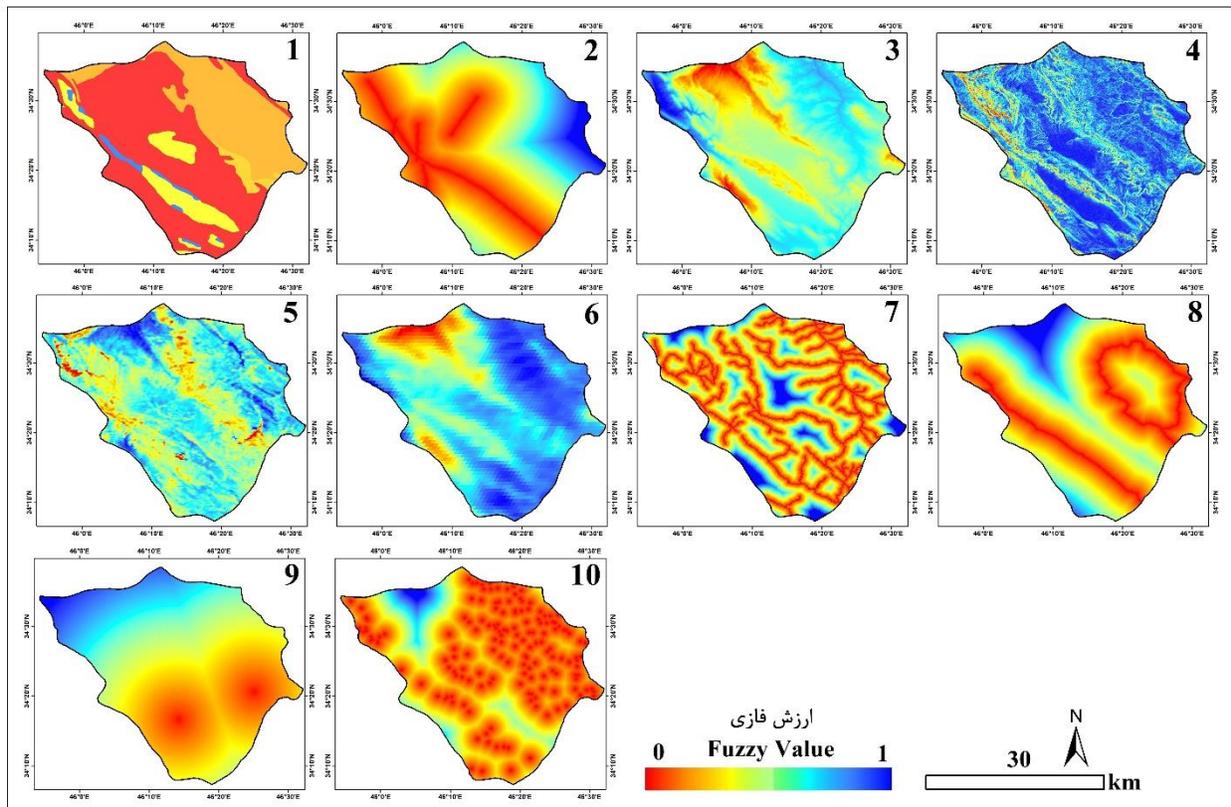
لیتولوژی و فاصله از گسل: پارامترهای زمین‌شناسی تعیین‌کننده وضعیت زیرساختی مناطق مختلف هستند و توجه به آن‌ها در برنامه‌ریزی‌های محیطی ضروری است. شهرستان دالاهو در واحد زاگرس چین‌خورده قرار دارد و با توجه به اینکه بخش زیادی از این واحد را توده‌های آهکی در بر گرفته است (Ganjaeian, 2024)، بنابراین از نظر لیتولوژی محدودیت‌های زیادی جهت دفن زباله دارد. در واقع، مناطق آهکی به دلیل پتانسیل نفوذپذیری بالایی که دارند، پتانسیل آلودگی و تخریب بالایی دارند (Pireh, Ghadimi & Ganjaeian, 2024)، بنابراین مناطق دفن زباله باید حداقل امکان از این مناطق دور باشد. همچنین خطوط گسلی نیز با توجه به اینکه تأثیر مستقیمی در توسعه درز و شکاف‌ها دارند و مناطق اطراف آن دارای پتانسیل نفوذپذیری بالایی هستند (Maghsoudi, Ganjaeian, Talari & Amani, 2016)، بنابراین در برنامه‌ریزی دفن زباله باید مورد توجه قرار گیرند و سایت‌های دفن زباله باید به دور از خطوط گسلی باشند. با توجه به موارد ذکر شده، به‌منظور استانداردسازی لایه‌های لیتولوژی و خطوط گسلی، به مناطق دارای لیتولوژی آهکی (شکل ۲-۱) و نزدیک به خطوط گسلی (شکل ۲-۲)، ارزش بیش‌تری داده شده است.

ارتفاع و شیب: مناطق مرتفع سرچشمه رودخانه‌های متعددی هستند و در زمان بارش، جریان رواناب از این مناطق به سمت مناطق پایین‌دست حرکت می‌کند، بر این اساس، دفن زباله در مناطق مرتفع، باعث آلودگی مناطق پایین‌دست می‌شود. همچنین دامنه‌های پرشیب نیز دارای جریان رواناب هستند و شیرابه‌های زباله‌ها از این دامنه‌ها به سمت مناطق اطراف سرازیر می‌شود. به‌علاوه، ایجاد زیرساخت‌های لازم حمل و نقل در مناطق پرشیب دشوار است. با توجه به موارد ذکر شده، به‌منظور استانداردسازی لایه‌های ارتفاع و شیب، به مناطق کم ارتفاع (شکل ۲-۳) و کم شیب (شکل ۲-۴)، ارزش بیش‌تری داده شده است.

تراکم پوشش گیاهی و بارش: مناطقی که پوشش گیاهی متراکمی دارند، دارای ارزش اکولوژی بالایی هستند بنابراین باید در برنامه‌ریزی‌های محیطی مورد توجه قرار گیرند. با توجه به اینکه سایت‌های دفن زباله باعث آلودگی و تخریب محیط می‌شوند، بنابراین باید این سایت به دور از مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم باشند. همچنین مناطقی که دارای بارش بیش‌تری هستند نیز پتانسیل آلودگی بالایی دارند. با توجه به موارد ذکر شده، به‌منظور استانداردسازی لایه‌های تراکم پوشش گیاهی و میانگین بارش سالانه، به مناطق با پوشش گیاهی کم تراکم (شکل ۲-۵) و بارش کم‌تر (شکل ۲-۶)، ارزش بیش‌تری داده شده است.

فاصله از رودخانه و جاده‌های اصلی: رودخانه‌ها حساسیت بالایی در برابر آلودگی و تخریب دارند و با توجه به اینکه زباله‌ها و پسماندها یکی از عوامل اصلی آلودگی رودخانه‌ها هستند، بنابراین سایت‌های دفن زباله باید به دور از رودخانه‌ها باشند و رعایت حریم رودخانه‌ها بسیار ضروری است. همچنین اراضی مجاور جاده‌های اصلی نیز پتانسیل بالایی جهت کاربری‌های مختلف دارند و مناسب برای دفن زباله نیستند. بر این اساس، به‌منظور استانداردسازی لایه‌های فاصله از رودخانه (شکل ۲-۷) و جاده (شکل ۲-۸)، به مناطق دور از رودخانه و جاده‌های اصلی، ارزش بیش‌تری داده شده است.

فاصله از نقاط شهری و روستایی: سایت‌های دفن زباله دارای آلودگی بالایی هستند و با توجه به اینکه می‌توانند منشا بیماری‌های زیادی باشند، باید به دور نواحی سکونتگاهی باشند. در واقع، در مکان‌بایی دفن زباله باید حریم شهرها و روستاها رعایت شود و حداقل مکان سایت‌های دفن زباله دور از نواحی سکونتگاهی باشند. بر این اساس، به‌منظور استانداردسازی لایه‌های فاصله از نقاط شهری (شکل ۲-۹) و روستایی (شکل ۲-۱۰)، به مناطق دور از نقاط شهری و روستایی، ارزش بیش‌تری داده شده است.



شکل ۲- نقشه‌های فازی‌سازی شده لایه‌های اطلاعاتی

Fig.2. Fuzzified maps of the data layers

وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی

پس از استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی، به‌منظور وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی از نظرات کارشناسان (۵ کارشناس ژئومورفولوژی و ۵ کارشناس محیط‌زیست) و مدل تحلیل شبکه‌ای (ANP) استفاده شده است و وزن نهایی هر لایه به‌دست آمده است. بر اساس نتایج حاصله، لایه‌های فاصله از رودخانه، تراکم پوشش گیاهی و لیتولوژی به ترتیب با وزن ۰/۱۷۲، ۰/۱۵۰ و ۰/۱۳۱، دارای بالاترین ارزش و اهمیت هستند (شکل ۳). لازم به ذکر است که به‌منظور بررسی اعتبار وزن‌های بدست آمده، به بررسی تحقیقات پیشین پرداخته شده است و بر اساس آن‌ها می‌توان گفت که اوزان به‌دست آمده دارای اعتبار هستند.

The inconsistency index is 0.0438. It is desirable to have a value of less than 0.1

ارتفاع	Elevation	0.075128
بارش	Precipitation	0.049566
تراکم پوشش گیاهی	Vegetation	0.150256
شیب	Slope	0.086300
فاصله از جاده	Dis. Road	0.065403
فاصله از رودخانه	Dis. River	0.172599
فاصله از روستا	Dis. Village	0.099132
فاصله از شهر	Dis. City	0.113873
فاصله از گسل	Dis. Fault	0.056937
لیتولوژی	Lithology	0.130806

شکل ۳- وزن نهایی لایه‌های اطلاعاتی

Fig.3. Final weight of the data layers

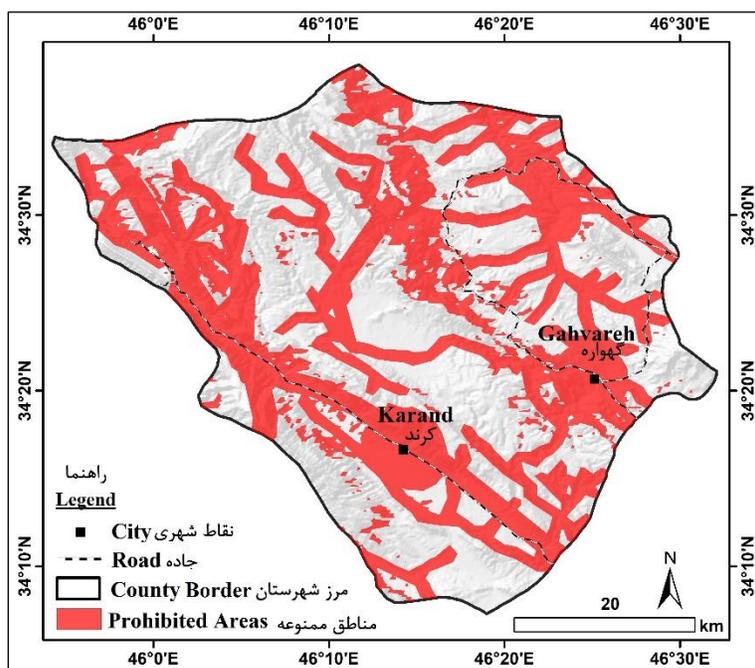
اعمال مناطق ممنوعه و تهیه نقشه نهایی

با توجه به اینکه بعضی از مناطق پتانسیل تخریب و آلودگی بالایی دارند و یا اینکه دارای ارزش محیط‌زیستی و اقتصادی بالایی هستند، اعمال مناطق ممنوعه ضروری است. در واقع، در این بخش ابتدا با توجه به وضعیت محیطی منطقه، مطالعات کتابخانه‌ای و نظرات کارشناسان، لایه مناطق ممنوعه تهیه شده است (جدول ۲). بر اساس نقشه تهیه شده، بخش زیادی از محدوده شهرستان دالاهو که در حریم رودخانه‌ها، حریم نقاط شهری، حریم دریاچه سد آزادی و حریم گسل‌ها هستند و همچنین دارای پوشش گیاهی متراکمی هستند به‌عنوان مناطق ممنوعه در نظر گرفته شده است (شکل ۴).

جدول ۲- معیارهای مورد نظر برای تهیه لایه مناطق ممنوعه

Table 2- Criteria for preparing the restricted areas layer

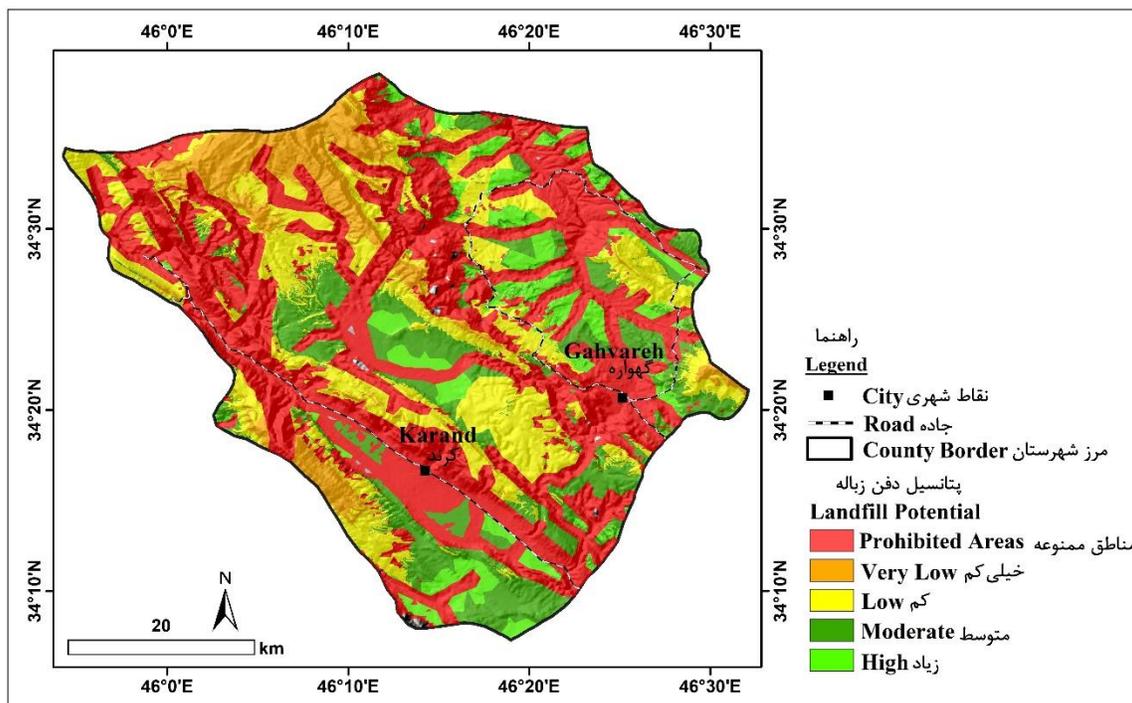
ردیف	پارامتر	مناطق ممنوعه
Row	Parameter	Prohibited areas
1	فاصله از رودخانه	حریم ۵۰۰ متری از رودخانه‌ها A distance of 500 meters from the rivers
2	فاصله از نقاط شهری	حریم ۳ کیلومتری از نقاط شهری A distance of 3 kilometers from the urban areas
3	فاصله از سد	حریم ۲ کیلومتری از دریاچه سد آزادی A distance of 2 kilometers from the Azadi dam
4	فاصله از گسل	حریم ۲ کیلومتری از خطوط گسلی A distance of 2 kilometers from the Faults
5	تراکم پوشش گیاهی	مناطق با ضریب NDVI بیش از ۰/۳ Areas with an NDVI coefficient of more than 0.3
	Vegetation density	



شکل ۴- نقشه مناطق ممنوعه

Fig.4. Map of restricted areas

پس از استانداردسازی و وزن دهی به لایه‌های اطلاعاتی، لایه‌های اطلاعاتی وارد نرم‌افزار IDRISI شده و سپس با استفاده از مدل WLC، لایه‌های اطلاعاتی با هم ترکیب شده است. پس از ترکیب لایه‌های اطلاعاتی، لایه مناطق ممنوعه بر روی آن اعمال شده است و در نهایت نقشه مناطق مستعد دفن زباله در شهرستان دالاهو تهیه شده است (شکل ۵). بر اساس نقشه تهیه شده، شهرستان دالاهو تحت تأثیر وضعیت لیتولوژی، توپوگرافی و هیدرولوژی، محدودیت‌های زیادی جهت دفن زباله دارد و در یک روند کلی، مناطق شرقی و جنوبی این شهرستان، پتانسیل بیشتری جهت دفن زباله دارد.



شکل ۵- نقشه نهایی مناطق مستعد دفن زباله در شهرستان دالاهو

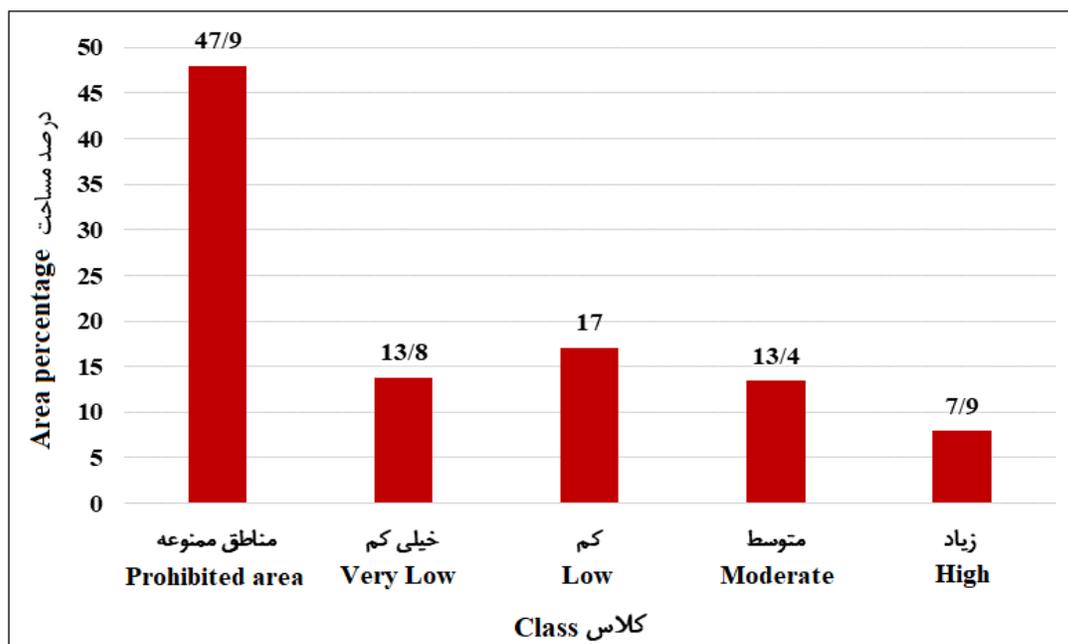
Fig.5. Final map of suitable areas for landfill in Dalaho County

نتایج ارزیابی مساحت و درصد مساحت کلاس‌ها نشان داده است (جدول ۳ و شکل ۶) که ۸۹۸ کیلومترمربع از وسعت شهرستان دالاهو (معادل ۴۷/۹ درصد از وسعت شهرستان) به دلیل قرار گرفتن در مناطق ممنوعه، فاقد پتانسیل دفن زباله است. ۵۷۸ کیلومترمربع از وسعت شهرستان دالاهو (معادل ۳۰/۱ درصد از وسعت شهرستان)، به دلیل نزدیکی به نقاط شهری و روستایی، ارتفاع و شیب زیاد، در طبقه پتانسیل کم و خیلی کم قرار دارند. همچنین ۱۴۹ کیلومترمربع از وسعت شهرستان دالاهو (معادل ۷/۹ درصد از وسعت شهرستان)، به دلیل دور بودن از نقاط شهری و روستایی، دور بودن از حریم رودخانه‌ها و گسل‌ها، ارتفاع و شیب کم، مستعد دفن زباله است.

جدول ۳- مساحت و درصد مساحت کلاس‌ها

Table 3- Area and percentage of the classes

ردیف (Row)	کلاس (Class)	مساحت (Area)	درصد مساحت (Area percentage)
1	مناطق ممنوعه (Prohibited) (area)	898	47/9
2	خیلی کم (Very Low)	259	13/8
3	کم (Low)	319	17
4	متوسط (Moderate)	251	13/4
5	زیاد (High)	149	7/9



شکل ۶- نمودار درصد مساحت کلاس‌ها

Fig.6. Chart of the percentage of the classes

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داده است که شهرستان دالاهو از نظر وضعیت زمین‌شناسی و هیدرواقليمی پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی در برابر آلودگی‌های محیطی دارد و بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که برنامه‌ریزی مناسب در زمینه دفن و دپوی زباله در این شهرستان بسیار حائز اهمیت است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، حدود ۴۸ درصد از وسعت شهرستان دالاهو که شامل حریم ۵۰۰ متری از رودخانه‌ها، حریم ۱ کیلومتری از خطوط گسلی، حریم ۳ کیلومتری از نقاط شهری، حریم ۲ کیلومتری از دریاچه سد آزاد و همچنین مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم است، پتانسیل آلودگی و تخریب محیط‌زیستی بالایی دارند و جزء مناطق ممنوعه هستند، بنابراین سایت‌های دفن زباله باید به دور از این مناطق باشد. همچنین حدود ۳۱ درصد از محدوده مطالعاتی نیز که عمدتاً شامل مناطق غربی و شمالی شهرستان دالاهو است به دلیل ارتفاع و شیب زیاد، نوع لیتولوژی و نزدیکی به خطوط گسلی، پتانسیل کم و خیلی کمی جهت ایجاد سایت دفن زباله دارند. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان گفت که تنها ۸ درصد از وسعت شهرستان دالاهو پتانسیل نسبی را برای دفن یا دپوی زباله دارد؛ اما بررسی پراکنش نقاط شهری و روستایی این شهرستان نشان داده است که در مناطق ممنوعه شهرستان دالاهو نیز نقاط شهری و روستایی زیادی وجود دارد و با توجه به اینکه در این شهرستان برنامه‌ریزی خاصی جهت دفن یا دپوی زباله وجود ندارد، بنابراین مکان‌های دفن زباله این شهرستان نقش مهمی در آلودگی محیط‌زیست و خصوصاً آلودگی مناطق آب سطحی و زیرزمینی این شهرستان دارند. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که حساسیت دفن زباله در مناطق مختلف یکسان نیست و شهرستان دالاهو مانند شهرستان‌های ماکو (Abbasnezhad et al., 2017) و گرگان (Emadodin et al., 2020) دارای حساسیت بالایی است و این مسئله در برنامه‌ریزی‌های مرتبط با مسائل محیط‌زیست و خصوصاً ایجاد سایت‌های دفن یا دپوی زباله باید مورد توجه جدی قرار گیرد.

References

- Abbasnezhad, J., Yarmoradi, Z., & Sarafrozeh, F. (2017). Site selection of waste disposal in Maku city By Fuzzy and Boolean. *Geographical Planning of Space*, 7(24), 87-98. [In Persian] https://gps.gu.ac.ir/article_50831.html?lang=en
- Aghsaei, H., & Sourì, B. (2017). Landfill Site Selection Using Spatial Information Technologies A Case Study in Sanandaj Municipality, Western Iran. *Environmental Researches*, 8(15), 215-229. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089597.1396.8.15.25.1>
- Alkaradaghi, K., Salahalddin, S. A., Al-Ansari, N., Laue, J., & Chabuk, A. (2019). Landfill Site Selection Using MCDM Methods and GIS in the Sulaimaniyah Governorate, Iraq. *Sustainability*, 11(17). <http://dx.doi.org/10.3390/su11174530>
- Bagherabadi, R. (2022). Locating the landfill in Sahneh county using GIS. *Management of Natural Ecosystems*, 2(1), 62-71. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/emj.2022.252721>
- Barakat, A., Hilali, A., El Baghdadi, M., & Touhami, F. (2017). Landfill site selection with GIS-based multi-criteria evaluation technique. A case study in Béni Mellal-Khouribga Region, Morocco. *Environmental Earth Sciences*, 76(12), 413. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12665-017-6757-8>
- Celiker, M., Yıldız, O., & Koçer, N. N. (2019). Evaluating solid waste landfill site selection using multi-criteria decision analysis and geographic information systems in the city of Elazığ, Turkey. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri DerGISi*, 25(6), 683-691. <http://dx.doi.org/10.5505/pajes.2018.70493>
- Chang, N. B., Parvathinathan, G., & Breeden, J. B. (2008). Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region. *Journal of Environmental Management*, 87(1), 139-153. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.011>
- Dehghani Ghanthastani, M., & Javadizadeh, F. (2021). Landfill site selection using a hybrid system of AHP in GIS environment: A case study in Sirik city. *Geography (Regional Planning)*, 10(41), 247-257. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286462.1399.11.1.15.9>
- Emadodin, S., Farzaneh, F., Arekhi, S., & Sayyad Salar, Y. (2020). Landfill Site Selection for Municipal Waste Materials using Analytic Hierarchy Process and Artificial Neural Networks (Case study: Gorgan City). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 9(2), 187-205. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geo.v9i2.86496>
- Ganjaeian, H. (2020). *Geomorphological hazards of urban areas, study methods and control strategies*. Tehran: Entekhab Publication. [In Persian]
- Ganjaeian, H. (2024). Analysis of the Tectonic Status of the Northwestern Zagros Anticlines and its Relationship with Seismic Centers. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(4), 275-290. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75370.1182>
- Ganjaeian, H., Rezaei Arefi, M., Peysoozi, T., Emami, K. (2021). 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., Yamani, M., Goorabi, A., & Maghsoudi, M. (2021). Adaptation of Morphotectonic Indices with Seismic Centers in Zagros Northwest (Sirvan and Qarahu 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>
- Hejazi, S. A. (2016). Landfill Site Selection Using Spatial Information Technologies and AHP: A Case Study of Marageh, Iran. *Journal of Geography and Planning*, 19(54), 105-125. [In Persian] https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_4471.html?lang=en
- Hereher, M. E., Al-Awadhi, T., & Mansour, S. A. (2020). Assessment of the optimized sanitary landfill sites in Muscat, Oman. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23(3), 355-362. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2019.08.001>

- Liang, Z., Tu, X., Liu, H., Zhang, K., Pan, Q., He, X., ... & Sang, Y. (2025). Occurrence of volatile and semi-volatile organic compounds in solid waste landfills and their pollution risk to groundwater. *Journal of Hazardous Materials*, 488, 137456. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137456>
- Maghsoudi, M., Ganjaeian, H., Talari, A., & Amani, K. (2016). Evaluation of the Contributing Factors in Development and Zoning Karst in Palangan Zone by Using Fuzzy Logic and ANP. *Open Journal of Geology*, 6, 468-483. <http://dx.doi.org/10.4236/ojg.2016.66039>
- Mainul, M. D., Ajim, A., & Ateeque, A. (2020). Optimal Sanitary Landfill Site Selection for Solid Waste Disposal in Durgapur City Using Geographic Information System and Multicriteria Evaluation Technique. *Journal of Cartography and Geographic Information*, 70, 163– 180. <http://dx.doi.org/10.1007/s42489-020-00052-1>
- Mallick, J. (2021). Municipal Solid Waste Landfill Site Selection Based on Fuzzy-AHP and Geoinformation Techniques in Asir Region Saudi Arabia. *Sustainability*, 13, 1-29. <https://doi.org/10.3390/su13031538>
- Mitab, B. T., Hamdoon, R. M., & Say, K. N. (2023). Assessing Potential Landfill Sites Using GIS and Remote Sensing Techniques: A Case Study in Kirkuk, Iraq. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 18(3), 643-652. <https://doi.org/10.18280/ijdne.180316>
- Mohammakhhan, 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>
- Nayyeri, H., Ganjaeian, H., & Amani, K. (2018). Evaluation of Environmental Indicator of Perimeters of the Land Suitability for the Development of the Sarvabad City by Combining Two Models of Network Analysis and Fuzzy Logic. *Journal of Urban Social Geography*, 5(1), 49-62. [In Persian] <https://doi.org/10.22103/JUSG.2018.1961>
- Nayyeri, H., Salari, M., Ganjaeian, H., & Amani, K. (2017). Geomorphological Assessment of Land Suitability for the Physical Expansion of Sanandaj City Applying Restricted Areas. *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*, 5(1), 127-145. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2017.63213>
- 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., Ebrahimi, A., & Gheysarian, S. S. (2025). Analysis of the Roles of Environmental Factors in the Occurrence of Floods Using the Google Earth Engine System (Case Study: West of Golestan Province). *Geography and Environmental Planning*, 35(4), 1-18. [In Persian] <https://doi.org/10.22108/gep.2024.142342.1659>
- Negahban, S., Ganjaeian, H., Feraydooni Kordestani, M., & Cheshmeh sefidi, Z. (2019). Assessing the physical development of cities and extending to geomorphological prohibited areas Using LCM (Case Study: Sanandaj City). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 8(20), 39-52. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/jneh.2018.21943.1317>
- Nikzada, V., Amiri, M. J., Moarab, Y., & Foroughi, N. (2017). Using Fuzzy Logic Analysis and Fuzzy ANP (FANP) Method in GIS for Landfill Site Selection (Case Study: Aliabad City). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 6(1), 67-87. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geo.v6i1.47944>
- Pireh, M., Ghadimi, M., & Ganjaeian, H. (2024). Identification of Vulnerable Karst Areas Using the COP Model (Case Study: Tekab Basin). *Geography and Environmental Planning*, 35(3), 95-112. [In Persian] <https://doi.org/10.22108/gep.2024.141035.1640>
- Rezapour, A., & Deymevar, S. (2024). Waste disposal site location allocation using GIS and fuzzy overlay method (Case study: Birjand county). *Integrated Watershed Management*, 4(3), 83-104. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/iwm.2024.2024112.1140>
- Roy, D., Das, S., Paul, S. S., & Pau, S. (2022). An assessment of suitable landfill site selection for municipal solid waste management by GIS-based MCDA technique in Siliguri municipal corporation planning area, West Bengal, India. *Computational Urban Science*, 2(18), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s43762-022-00038-x>
- Safari Namivandi, M., Ganjaeian, H., Nosrati, M., & Mohammadian, K. (2024). Identification of flooded areas and analysis of factors influencing its occurrence (Case study: Southeast of Sistan and Baluchestan province).

- Quantitative Geomorphological Research*, 13(2), 181-194. [In Persian]
<https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.449586.1494>
- 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>
- Salari, M., Nayyeri, H., Ganjaeian, H., & Amani, K. (2020). Assessment and Prediction of the process of expansion of residential areas with Geomorphological Approach and Environmental Management (Case Study: Paveh City). *Quantitative Geomorphological Research*, 9(1), 86-101. [In Persian]
https://www.geomorphologyjournal.ir/article_109536_en.html
- Soltani, A., Hewage, K., Reza, B., & Sadiq, R. (2015). Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of Municipal Solid Waste Management: A review. *Waste Management*, 35, 318-328.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.010>
- Tabesh, S., Noori Khanyourdi, M., Dousti, M., & Ganjaeain, H. (2020). Presenting the proposed model for the location of sports places using the integrated model of WLC and AHP. *Sport Management and Development*, 9(1), 2-22. [In Persian] <https://doi.org/10.22124/jsmd.2020.4096>
- Wu, T. H., Chen, C. Y., Huang, S. W., & Yu, T. T. (2025). An integrated decision framework for landfill mining site selection using GIS, multi-criteria analysis, and optimization models. *Socio-Economic Planning Sciences*, 99, 102220. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2025.102220>

(Research Journal)
VOLUME 14, NO 55, Autumn 2025

CONTENTS

Identification of Dust Sources Using Spatio-Temporal Tensor of Aerosol Optical Depth in Ilam County	1
Ramin Karami; Hossein Etemadfard	
Analysis of the Effects of Tectonic Processes on Geomorphological Features and Assessment of Slope Instability Hazard Potential in the Shaharchay River Basin of Urmia	18
Fariba Hemmati; Saber Seyyed Ahmadi; Akram Alizadeh	
Modeling Landslide Susceptibility Using Artificial Neural Network Algorithm: A Case Study of Shahid Abbaspour Dam Basin, Northeast Khuzestan	38
Mahshid Moavi; Heeva Elmizadeh; Mojgan Entezari	
Morphotectonic and Seismicity Investigation in the Northern and Southeastern of Central Iran	55
Najimeh Eskandari; Majid Nemati; Shahram Shafieibafti	
Assessing the Effects of Land Use Change on Flood Occurrence in the Mordaq Chai Watershed Using the SWAT and Artificial Neural Network Models	72
Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam; Atefeh Haghghat; Tohid Rahimpour; Abdollah Behboody	
Structural Analysis and Regime Shift of Drought in Iran Using a Three-Dimensional Clustering Approach	93
Javad Mahdizadeh Soula; Yousef Ghavidel Rahimi; Manuchehr Farajzadeh	
Forecasting and Trending of Precipitation in Selected Cities of the Northern Half of Iran Using ACCESS and CNRM Models	116
Roghayeh Maleki Meresht; Bromand Salahi; Mahnaz Saber	
General Characteristics of the Lightning Phenomenon in Iran	140
Hamzeh Alizadeh; Hossien Asakereh; Koohzad Raispour	
Spatio-Temporal Analysis of Earthquake Occurrences in Iran (1996–2024): A Vulnerability Assessment with a Focus on Urban Areas	166
Roya Moghabeli; Faezeh Bahadori; Alireza Mohammadi	
Dam Construction in the Light of Green Criminology: A Content Analysis of the Novel <i>After the Cloud</i>	190
Hamid Reza Danesh Nari; Abolfazl Sherafati	
Analysis of Factors Affecting Urban Environmental Pollution in Coastal Areas (Bandar Anzali, Rezvanshahr and Astara) Using (AHP and RF) Models	211
Zahra Pourmoghadam; Mojtaba Yamani; Mansour Jafar Biglo	
Landfill Suitability Site Selection Using Environmental Parameters and Exclusion Zones (Case Study: Dalahu County)	235
Saied Asadollah Hejazi; Zahra Zanganeh Tabar	

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: Maryam Mohammadi Shandiz

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 Valizadeh Kamran

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.

CONTENTS

Identification of Dust Sources Using Spatio-Temporal Tensor of Aerosol Optical Depth in Ilam County	1
Ramin Karami; Hossein Etemadfard	
Analysis of the Effects of Tectonic Processes on Geomorphological Features and Assessment of Slope Instability Hazard Potential in the Shaharchay River Basin of Urmia	18
Fariba Hemmati; Saber Seyyed Ahmadi; Akram Alizadeh	
Modeling Landslide Susceptibility Using Artificial Neural Network Algorithm: A Case Study of Shahid Abbaspour Dam Basin, Northeast Khuzestan	38
Mahshid Moavi; Heeva Elmizadeh; Mojgan Entezari	
Morphotectonic and Seismicity Investigation in the Northern and Southeastern of Central Iran	55
Najimeh Eskandari; Majid Nemati; Shahram Shafieibafti	
Assessing the Effects of Land Use Change on Flood Occurrence in the Mordaq Chai Watershed Using the SWAT and Artificial Neural Network Models	72
Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam; Atefeh Haghghat; Tohid Rahimpour; Abdollah Behboody	
Structural Analysis and Regime Shift of Drought in Iran Using a Three-Dimensional Clustering Approach	93
Javad Mahdizadeh Soula; Yousef Ghavidel Rahimi; Manuchehr Farajzadeh	
Forecasting and Trending of Precipitation in Selected Cities of the Northern Half of Iran Using ACCESS and CNRM Models	116
Roghayeh Maleki Meresht; Bromand Salahi; Mahnaz Saber	
General Characteristics of the Lightning Phenomenon in Iran	140
Hamzeh Alizadeh; Hossien Asakereh; Koohzad Raispour	
Spatio-Temporal Analysis of Earthquake Occurrences in Iran (1996–2024): A Vulnerability Assessment with a Focus on Urban Areas	166
Roya Moghabeli; Faezeh Bahadori; Alireza Mohammadi	
Dam Construction in the Light of Green Criminology: A Content Analysis of the Novel <i>After the Cloud</i>	190
Hamid Reza Danesh Nari; Abolfazl Sherafati	
Analysis of Factors Affecting Urban Environmental Pollution in Coastal Areas (Bandar Anzali, Rezvanshahr and Astara) Using (AHP and RF) Models	211
Zahra Pourmoghadam; Mojtaba Yamani; Mansour Jafar Biglo	
Landfill Suitability Site Selection Using Environmental Parameters and Exclusion Zones (Case Study: Dalahu County)	235
Saied Asadollah Hejazi; Zahra Zanganeh Tabar	



Ferdowsi University of Mashhad



Vol.14, No. 3, Autumn 2025

Journal of Geography and Environmental Hazards

Research Journal



Published by: Ferdowsi University of Mashhad ISSN: 2322-1682

Afghanistan Earthquake, 31 August 2025

<https://www.lemonde.fr/>

