سال چهاردهم، شماره ۲، پیاپی ۵۴، تابستان ۱۴۰۴

(نشریه علمی)

مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی



دانشگاه فردوسی مشهد، شاپا: ۲۳۲۲-۱۶۸۲

فصلنامه
جغرافیا و مخاطرات محیطی
(نشریه علمی)

سال چهاردهم، شماره پنجاه و چهارم، تابستان ۱۴۰۴

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

واکاوی موقعیت مکانی رودباد جنب‌حاره و شرایط همدید مؤثر بر ترسالی‌های شدید شمال‌شرق ایران
هما درستکار گل خیلی؛ حسن لشکری؛ زینب محمدی

ارزیابی کارایی شبکه عصبی پرسپترونی چندلایه در پیش‌نگری طوفان‌های گردوغبار برخی ایستگاه‌های سواحل خلیج فارس (آبادان، اهواز و بوشهر)
فاطمه وطن پرست قلعه‌جوق؛ برومند صلاحی

واکاوی همدیدی و ماهواره‌ای گردوخاک در استان کردستان
سید اسعد حسینی؛ مهدی رهنما؛ حمید باقری؛ علی پناهی؛ بهرام چاره خواه؛ خه بات قمری؛ نوشین خدام؛ فائزه نوری؛ ساویز صحت کاشانی

آشکارسازی پیامدهای تغییر اقلیم بر پارامترهای بارش و دما در حوضه آبریز کابل افغانستان با استفاده از مدل لارس
عبدالعزیز قاضی زاده؛ کمال امیدوار؛ غلامعلی مظفری؛ احمد مزیدی

ارزیابی ریسک‌های ناشی از تغییرات اقلیم بر اکوسیستم‌های تالابی با استفاده از مدل GCM (مطالعه موردی: تالاب‌های آلاگل، آجی‌گل و آلماگل، استان گلستان)
صالح آرخی؛ ابوالقاسم ممشلی؛ عبدالحافظ پناهی

برآورد شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری و طبقه‌بندی آسایش حرارتی با استفاده از دمای سطح زمین (مطالعه موردی: شهر ساری)
کاکا شاهدی؛ آرمان کیانی؛ صلاح محمدی سروآله

بررسی و شناسایی نقاط مناسب جهت نصب حسگرهای کم‌هزینه در پایش برخَط آلودگی هوای شهری
مسعود ابراهیمی قادی؛ احمد نوحه گر؛ زینب سازور؛ محمود بهروزی

ارزیابی مخاطره خشکسالی و اثرات آن بر ناپایداری روستاهای مقصد گردشگری مورد مطالعه: روستاهای مقصد گردشگری منطقه ترشیز
فهیمه جعفری؛ خدیجه بوزرجمهری؛ حسنعلی فرجی سبکبار؛ حمدالله سجاسی قیداری

مطالعه تأثیر توانمندسازی زنان روستایی در دست‌یابی به توسعه پایدار و حفاظت محیط‌زیست (یک مطالعه سنتزپژوهی)
مهتاب موسوی؛ امیرعلی برومند؛ فاطمه طباطبائی یزدی

بررسی نقش لندفرم‌ها در میزان فرسایش خاک با مدل RUSLE و سامانه GEE ، مطالعه موردی: حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند
موسی عابدینی؛ ابوذر صادقی؛ عقیل مددی

تحلیل رابطه بین حساسیت زمین‌لغزش ها با شدت فرسایش و تولید رسوب (مطالعه موردی: حوضه دارابکلا، استان مازندران)
سمانه یوسفی؛ عیسی جوکار سرهنگی؛ رضا اسماعیلی

تحلیل تغییرات ائواستاتیک و ژئوستاتیک در پایداری جلگهٔ ساحلی خزر (مطالعهٔ موردی: چالوس)
محمد فتح اله زاده؛ مجتبی یمانی؛ ابوالقاسم گورابی؛ مهران مقصودی؛ مهرنوش قدیمی

بررسی میزان جابجایی سطح زمین ناشی از زمین لرزه با استفاده از تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی :استان ایلام، گسل پیشانی کوهستان)
زهرا کل میشی؛ ایمان روستا؛ رحمان زندی

تحلیل روند تغییرات گذشته وآینده کاربری اراضی حوزه آبخیز زولاچای
طیبه ایرانی؛ هیراد عبقری؛ علی اکبر رسولی

مدل‌سازی تغییرات مکانی مؤلفه‌های کیفی آب با استفاده از متغیرهای ژئومورفومتری (مطالعه موردی: حوضه‌های آبخیز تالش)
فهیمه پورفراش زاده؛ عقیل مددی؛ مرتضی قراچورلو

دانشکده ادبیات و علوم انسانی

فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوس مشهد

مدیر مسئول: دکتر سید رضا حسین زاده

سردبیر: دکتر سید رضا حسین زاده

هیئت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

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

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

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

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

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

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

مدیر داخلی: دکتر مسعود رحیمی **ویراستاری انگلیسی:** مریم محمدی شاندیز

ویراستاری ادبی- علمی: دکتر سید رضا حسین زاده

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

عکس جلد: محمد مهیمنی، خبرگزاری مهر

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

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

نشانی اینترنتی: https://geoeh.um.ac.ir/ E-mail: geo.eh@um.ac.ir

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

این مجله در پایگاه های زیر نمایه می‌شود:

پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC)
پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)
پایگاه بانک اطلاعات نشریات کشور (Magiran)
DOAJ (Directory of Open Access Journals)
EBSCO
Google Scholar

بسم الله الرحمن الرحیم

فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی

(نشریه علمی)

سال چهاردهم، شماره پنجاه و چهارم، تابستان ۱۴۰۴

شاپا چاپی: ۱۶۸۲-۲۳۲۲

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۳۰۷۶

اهداف

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

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

حوزه های موضوعی

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

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

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

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

نحوه دریافت مقاله‌ها:

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

زبان و سبک: زبان مقالات مورد پذیرش نشریه فارسی به همراه چکیده ساده انگلیسی (حداکثر ۲۰۰ کلمه) و چکیده مبسوط انگلیسی (بین ۷۰۰ تا ۱۵۰۰ کلمه) می باشد.

انواع مقالات:

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

تبصره:

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

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

آماده‌سازی مقاله

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

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

الزامات قالب‌بندی:

ساختار مقاله شامل بخش‌های زیر می باشد:

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

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

محدودیت‌های تعداد کلمات :

- **متن اصل مقاله** :۳۰۰۰ تا ۷۰۰۰ کلمه
- **چکیده مبسوط انگلیسی**: ۷۰۰ تا ۱۵۰۰ کلمه
- **کلمات کلیدی**: حداقل ۳ و حداکثر ۵ عدد

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

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

- متن مقاله روی کاغذ A4 بدون هر گونه آرم و نشان و به‌صورت تک‌ستونه ارسال شود.
- کلیه صفحات مقاله باید دارای شماره بوده و تعداد صفحات مقاله پس از حذف جداول و شکل ها از ۱۵صفحه تجاوز نکند.
- حاشیه صفحه‌ها از بالا ۳/۵، از پایین ۳/۵، از راست و چپ ۳ سانتی‌متر باشد و فاصله سطرها ۱٫۵ (۵ lines) تنظیم شود.
- پاورقی در هر صفحه به‌صورت مستقل با شماره‌گذاری از یک آغاز شود.
- تیترهای اصلی و فرعی شماره نداشته باشند.
- تمام اعداد و ارقام در متن فارسی باشد و در صورت اعشاری بودن اعداد، ممیز به صورت (/) نوشته شود (اعداد فقط در جدول‌ها و شکل‌ها به انگلیسی است).
- توضیح شکل‌ها (زیرنویس) و توضیح جدول‌ها (بالانویس) به دو زبان فارسی و انگلیسی باشد (در فارسی و انگلیسی مطابق هم باشند).
- استنادهای درون متنی و منابع انتهای مقاله به زبان انگلیسی باشند (کلیه پرانتزهای باز و بسته استنادهای درون متنی با فونت فارسی باشد).
- در کل متن، نیم‌فاصله‌ها رعایت شود.
- فهرست‌های عددی یا بولتی (توپی خالی) نیم‌سانتی‌متر قبل از متن تورفتگی بخورد.
- عنوان هر بخش یا زیربخش، با یک سطر خالی فاصله از انتهای متن بخش قبلی تایپ شود. در متن مقاله از شماره‌گذاری عنوان‌ها خودداری فرمایید.

فونت

- کلیه کلمات فارسی مقاله با قلم فارسی B Nazanin نوشته شود.
- کلیه کلمات انگلیسی مقاله با قلم Times New Roman نوشته شود.
- عنوان فارسی با اندازه ۱۶ و انگلیسی مقاله با اندازه ۱۴ نوشته شود.
- عنوان‌های اصلی با اندازه ۱۲ توپر (Bold) نوشته شود.
- متن مقاله با اندازه ۱۲ تایپ شود.
- کلمات لاتین داخل متن با اندازه ۱۰ نوشته شود.
- تمامی اسامی علمی به‌صورت ایتالیک درج شوند.
- عناوین شکل‌ها و جدول‌ها به دو صورت فارسی و انگلیسی به‌ترتیب با اندازه ۱۱ و ۱۰ نوشته شود.
- شماره جدول و شکل به‌صورت توپر (Bold)بوده و کلیه شکل‌ها و جدول‌ها بدون کادر باشند.
- عناوین محورها در همه نمودارها و یا شکل‌ها یکسان و اندازه قلم آن‌ها از ۸ کوچکتر و از ۱۱ بزرگتر نباشد.
- پاورقی در هر صفحه به‌صورت مستقل با شماره‌گذاری از یک آغاز شود و فونت آن برای زبان فارسی10 ,B Nazanin و زبان انگلیسی Times New Roman, 9 .

راهنمایی برای شفافیت و اختصار:

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

جداول:

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

شکل‌ها و تصاویر:

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

فرمول‌ها و روابط ریاضی

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

واحدهای اندازه‌گیری

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

منابع

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

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

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

هزینه‌های مرتبط با انتشار

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

دستورالعمل‌های تکمیلی برای نویسندگان:

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

داوران این شماره به ترتیب حروف الفبا

مرضیه اسماعیل پور	استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
صیاد اصغری سراسکانرود	استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
جمیل امان اللهی	دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
خدیجه بوذرجمهری	دانشیار جغرافیا و برنامه ریزی روستایی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
مهرداد چراغی	استاد محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، همدان، ایران
محسن حمیدیان پور	دانشیار جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
محمود خسروی	استاد اقلیم شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
عباسعلی داداشی رودباری	استادیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
رضا دوستان	دانشیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
مسعود رحیمی	استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
یوسف رحیمی قویدل	استاد اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
شهرام روستائی	استاد جغرافیای طبیعی، ژئومورفولوژی ، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
بتول زینالی	دانشیار اقلیم شناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی ، اردبیل، ایران
حمید شایان	استاد جغرافیا و برنامه ریزی روستایی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
طاهره صادقلو	دانشیار جغرافیا و برنامه ریزی روستایی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
قاسم عزیزی	استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
حسین عساکره	استاد اقلیم شناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
عبدالله فرجی	دانشیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
منوچهر فرج زاده اصل	استاد جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
منیژه قهرودی تالی	استاد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران
رئوف مصطفی زاده	دانشیار گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
غلامرضا مقامی مقیم	دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران
مسعود مینائی	دانشیار علوم اطلاعات جغرافیایی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
سعید نگهبان	دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
فریبا همتی	استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران
مجتبی یمانی	استاد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

فهرست مندرجات

عنوان	صفحه
واکاوی موقعیت مکانی رودباد جنب‌حاره و شرایط همدید مؤثر بر ترسالی‌های شدید شمال‌شرق ایران هما درستکار گل خیلی؛ حسن لشکری؛ زینب محمدی	۱
ارزیابی کارایی شبکه عصبی پرسپترونی چندلایه در پیش‌نگری طوفان‌های گردوغبار برخی ایستگاه‌های سواحل خلیج فارس (آبادان، اهواز و بوشهر) فاطمه وطن پرست قلعه‌جوق؛ برومند صلاحی	۲۱
واکاوی همدیدی و ماهواره‌ای گردوخاک در استان کردستان سید اسعد حسینی؛ مهدی رهنما؛ حمید باقری؛ علی پناهی؛ بهرام چاره خواه؛ خه بات قمری؛ نوشین خدام؛ فائزه نوری؛ ساویز صحت کاشانی	۴۵
آشکارسازی پیامدهای تغییر اقلیم بر پارامترهای بارش و دما در حوضه آبریز کابل افغانستان با استفاده از مدل لارس عبدالعزیز قاضی زاده؛ کمال امیدوار؛ غلامعلی مظفری؛ احمد مزیدی	۶۸
ارزیابی ریسک‌های ناشی از تغییرات اقلیم بر اکوسیستم‌های تالابی با استفاده از مدل GCM (مطالعه موردی: تالاب‌های آلاگل، آجی‌گل و آلماگل،استان گلستان) صالح آرخی؛ ابوالقاسم ممشلی؛ عبدالحافظ پناهی	۸۸
برآورد شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری و طبقه‌بندی آسایش حرارتی با استفاده از دمای سطح زمین (مطالعه موردی: شهر ساری) کاکا شاهدی؛ آرمان کیانی؛ صلاح محمدی سروآله	۱۲۲
بررسی و شناسایی نقاط مناسب جهت نصب حسگرهای کم‌هزینه در پایش برخَط آلودگی هوای شهری مسعود ابراهیمی قادی؛ احمد نوحه گر؛ زینب سازور؛ محمود بهروزی	۱۴۵
ارزیابی مخاطره خشکسالی و اثرات آن بر ناپایداری روستاهای مقصد گردشگری مورد مطالعه: روستاهای مقصد گردشگری منطقه ترشیز فهیمه جعفری؛ خدیجه بوزرجمهری؛ حسنعلی فرجی سبکبار؛ حمدالله سجاسی قیداری	۱۷۳
مطالعه تأثیر توانمندسازی زنان روستایی در دست‌یابی به توسعه پایدار و حفاظت محیط‌زیست (یک مطالعه سنتزپژوهی) مهتاب موسوی؛ امیرعلی برومند؛ فاطمه طباطبائی یزدی	۱۹۹
بررسی نقش لندفرم‌ها در میزان فرسایش خاک با مدل RUSLE و سامانه GEE ، مطالعه موردی: حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند موسی عابدینی؛ ابوذر صادقی؛ عقیل مددی	۲۲۳
تحلیل رابطه بین حساسیت زمین‌لغزش‌ها با شدت فرسایش و تولید رسوب(مطالعه موردی: حوضه دارابکلا، استان مازندران) سمانه یوسفی؛ عیسی جوکار سرهنگی؛ رضا اسماعیلی	۲۴۵
تحلیل تغییرات ائواستاتیک و ژئوستاتیک در پایداری جلگهٔ ساحلی خزر (مطالعهٔ موردی: چالوس) محمد فتح اله زاده؛ مجتبی یمانی؛ ابوالقاسم گورابی؛ مهران مقصودی؛ مهرنوش قدیمی	۲۶۶
بررسی میزان جابجایی سطح زمین ناشی از زمین لرزه با استفاده از تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی :استان ایلام، گسل پیشانی کوهستان) زهرا کل میشی؛ ایمان روستا؛ رحمان زندی	۲۸۷
تحلیل روند تغییرات گذشته وآینده کاربری اراضی حوزه آبخیز زولاچای طیبه ایرانی؛ هیراد عبقری؛ علی اکبر رسولی	۳۰۸
مدل‌سازی تغییرات مکانی مؤلفه‌های کیفی آب با استفاده از متغیرهای ژئومورفومتری (مطالعه موردی: حوضه‌های آبخیز تالش) فهیمه پورفراش زاده؛ عقیل مددی؛ مرتضی قراچورلو	۳۲۹

بسمه‌تعالی

توافقنامه همکاری علمی

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

دکتر احمدرضا بهرامی
معاون پژوهشی و فن‌آوری دانشگاه فردوسی مشهد

معاونت پژوهش و فناوری

دکتر فریبرز قریب
رییس هیات مدیره انجمن کواترنری ایران

انجمن کواترنری ایران

بسمه تعالی

توافقنامه همکاری علمی

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

دکتر مجتبی یمانی
رییس هیات مدیره انجمن ایرانی ژئومورفولوژی

دکتر احمدرضا بهرامی
معاون پژوهشی و فن‌آوری دانشگاه فردوسی مشهد

معاونت پژوهش و فناوری

Vol.14, No.2, Summer 2025, p. 1-20 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2025.91689.1542 OPEN ACCESS

Analysis of the Spatial Position of the Subtropical Jet Stream and Synoptic Conditions Influencing Extreme Wet Years in Northeast of Iran

Homa Dorostkar Golkhaili [1], Hasan Lashkari [2], Zainab Mohammadi [3]

[1] PhD Student of Climatology, Department of Physical Geography, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
[2] Professor in Climatology, Department of Physical Geography, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
[3] Postdoctoral in Synoptic Climatology, Department of Physical Geography, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received:19 January 2025

Revise Date: 11 May 2025

Accepted: 15 May 2025

Available Online: 17 May 2025

Keywords:

Subtropical Jet Stream

Jet Stream Positioning

Synoptic Climatology

Extreme Precipitation Events

Northeastern of Iran

ABSTRACT

Subtropical jet streams are crucial upper-tropospheric synoptic systems that play a significant role in shaping regional precipitation through large-scale moisture transport and dynamic forcing. This study investigates the spatial characteristics, positioning, and elongation patterns of the subtropical jet stream during extremely wet years in northeastern Iran. Daily precipitation data from meteorological stations across North Khorasan and Razavi Khorasan provinces over a 33-year period, covering solar cycles 22 to 24, were used to identify extreme wet years based on the Standardized Precipitation Index (SPI) and DIP software. Upper-air variables, including zonal and meridional wind components, specific humidity, and vertical velocity (omega) at the 1000–500 hPa levels, were retrieved from the NCEP/NCAR and ECMWF reanalysis datasets. The findings indicate that during intense rainfall episodes, the jet stream core frequently shifts northward beyond 33°N latitude, enhancing atmospheric instability and promoting widespread precipitation. The most favorable jet core position is located between western Iran, the southern Caspian Sea, and the Semnan province. Additionally, among the dominant synoptic patterns identified, the Sudan Low was found to be the most frequent and influential system contributing to increased precipitation. These results underscore the dynamic influence of upper-level circulation patterns on the hydroclimate variability of northeastern Iran.

* Corresponding author: Dr. Hasan Lashkari E-mail address: h-lashkari@sbu.ac.ir

How to cite this article: Dorostkar Golkhaili, H., Lashkari, H., & Mohammadi, Z. (2025). Analysis of the Location of the Subtropical Jet Stream and Synoptic Conditions Affecting Wet Year in the Northeastern of Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 14*(2), 1-20. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.91689.1542

©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 jet core is one of the most important factors in dynamic ascent; the position of the subtropical jet stream regulates and transforms atmospheric flows at all levels between the tropics and extratropics. The jet stream, which generally forms in the higher levels of the troposphere, plays a fundamental role in controlling the path of rain-producing systems, the timing of their entry and exit, determining precipitation periods, and influencing seasonal changes due to the intensification of divergence and convergence at its lower levels. Therefore, studying the behavior of the jet stream and determining the dominant synoptic pattern or patterns in extremely wet years is of particular importance for the proper management of water resources and the identification or prediction of possible risks, losses, and damages caused by floods.

Regarding the research topic, studies have been conducted on pressure systems or precipitation-generating systems in northeastern Iran, but no comprehensive research has been conducted on the location of the jet stream's establishment in relation to the creation of wet year conditions in this region, or on the dominant synoptic patterns responsible for creating the above conditions, which we address in this research. The aim of the present study is to determine the best location and elongation pattern of the subtropical jet under wet year conditions and to identify the dominant synoptic patterns in northeastern Iran.

Material and Methods

This research takes an environmental approach to circulation. In this regard, synoptic stations in northeastern Iran were selected for study over a 33-year statistical period (1986–2019), corresponding to the three most recent solar cycles (1986–1997; 1997–2008; 2008–2019). In the next step, precipitation data from the selected stations were obtained from the Meteorological Organization of Iran. Then, by using the SPI index with categories ranging from humid to extremely humid, and using DIP software, severely wet years in the region were determined.

The wet years identified are as follows:

- First cycle: 1991–1992 and 1992–1993
- Second cycle: 1997–1998
- Third cycle: 2018–2019

Next, heavy and extremely heavy rainfall days were identified at the stations in the region. Out of the total rainfall days in northeastern Iran during the statistical interval, days equal to or above the 50th percentile were considered as heavy rainfall days. Atmospheric data for these days—including the zonal wind component, meridional wind component, geopotential height at 250 hPa, sea-level pressure (SLP), specific humidity, and omega—were retrieved from the NCEP/NCAR and ECMWF websites for the 1000, 925, 850, 700, and 500 hPa levels, across the region spanning 0° to 100° east longitude and 0° to 65° north latitude. To identify the most frequent jet stream pattern, a factor analysis, KMO criterion, and Bartlett's test were conducted using SPSS24 software.

Results and Discussion

In this study, the spatial and temporal location of the zonal jet in northeastern Iran was investigated across three solar cycles (22, 23, and 24) at the 250 hPa level. On all days when heavy rainfall was recorded at the regional stations, the subtropical jet stream was observed at either lower southern latitudes or higher northern latitudes, sometimes extending over the northern half of Iran.

During the most severe wet years, the jet core locations were found within 48° to 60° east longitude and 33° to 40° north latitude—directly over the study area. The jet cores were concentrated and coherent, which had a significant impact on precipitation. The jet axes during these years were short, entirely meridional, and stretched from the Persian Gulf to Central Asia.

In the analysis of synoptic patterns, the Sudan low-pressure system emerged as the most influential in the severe wet years of northeastern Iran. This system was typically located in the lower troposphere, moving

in a southwest–northeast direction over eastern and northeastern Iran. Simultaneously, the African High was positioned over the Mediterranean Sea, and cold advection from northern latitudes behind the Sudan system increased the temperature gradient on its western slope.
Moreover, the Tibetan High, extending over the warm Oman and Arabian seas, transported moisture from these sources into the Sudan system and subsequently toward northeastern Iran. At the 700 hPa level and above, a deep trough extending from northwest Iran to the southern Arabian Peninsula placed northeastern Iran on its right flank, enhancing precipitation. At the same time, the Arabian High, positioned over the Arabian Sea, further contributed to moisture transport through circulation ahead of the trough.

Conclusion

The results of this study showed that on the most intense rainy days in the region, the subtropical jet stream was often located above 33°N latitude and contributed to intense and widespread rainfall. The optimal position for the central cores of the subtropical jet, to create wet year conditions in northeastern Iran, lies between the western part of Iran, the southern Caspian Sea, and Semnan Province. Additionally, among the dominant synoptic patterns identified, the Sudan low-pressure system was the most frequent and influential pattern under extremely wet year conditions and had the greatest impact on rainfall in the region.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۲۰-۱

نشریه علمی
جفرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2025.91689.1542 دسترسی آزاد

واکاوی موقعیت مکانی رودباد جنب‌حاره و شرایط همدید مؤثر بر ترسالی‌های شدید شمال‌شرق ایران

هما درستکار گل‌خیلی [۱]، حسن لشکری [۲*]، زینب محمدی [۳]

[۱] دانشجوی دکتری اقلیم شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
[۲*] استاد اقلیم شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
[۳] پسادکتری اقلیم‌شناسی سینوپتیک، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵

کلمات کلیدی:
رودباد جنب حاره
موقعیت‌یابی رودباد جنب‌حاره
اقلیم‌شناسی همدیدی
رخدادهای بارشی حدی
شمال‌شرق ایران

چکیده

رودباد جنب‌حاره‌ای از مهم‌ترین سامانه‌های سینوپتیکی تراز فوقانی وردسپهر است که از طریق انتقال رطوبت در مقیاس بزرگ و تحریک دینامیکی، نقش مهمی در شکل‌دهی به الگوهای بارشی مناطق مختلف ایفا می‌کند. این پژوهش به بررسی ویژگی‌های مکانی، موقعیت استقرار و الگوی کشیدگی رودباد جنب‌حاره‌ای در سال‌های ترسالی شدید شمال‌شرق ایران پرداخته است. داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های استان‌های خراسان شمالی و رضوی در یک دوره آماری ۳۳ ساله، منطبق با چرخه‌های خورشیدی ۲۲ تا ۲۴، برای شناسایی سال‌های ترسالی شدید با استفاده از شاخص SPI و نرم‌افزار DIP به‌کار رفت. متغیرهای جوی تراز فوقانی شامل مؤلفه‌های باد مداری و نصف‌النهاری، نم ویژه و سرعت قائم (امگا) در ترازهای ۱۰۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال از داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR و ECMWF استخراج شد. نتایج نشان داد که در دوره‌های بارش شدید، هسته رودباد اغلب به عرض‌های شمالی‌تر از ۳۳ درجه جابجا شده، ناپایداری جو را افزایش داده و موجب بارش گسترده می‌شود. موقعیت مطلوب هسته رودباد، منطقه‌ای بین غرب ایران، جنوب دریای خزر و استان سمنان است. همچنین، کم‌فشار سودان پرتکرارترین و مؤثرترین الگوی همدیدی مرتبط با افزایش بارش شناسایی شد. این نتایج نقش مؤثر الگوهای چرخش تراز بالا در تغییرپذیری اقلیم هیدرولوژیکی منطقه را نشان می‌دهد.

* نویسنده مسئول: دکتر حسن لشکری
E-mail address: h-lashkari@sbu.ac.ir

مقدمه

بروز ترسالی به عنوان یک ناهنجاری جوی، از جمله پدیده‌های طبیعی و فرین‌های اقلیمی است که ریشه در تغییرپذیری اقلیم از جمله گردش عمومی جو دارد. شناخت دقیق سازوکار و نحوه‌ی عمل الگوی گردش جوی و عناصر مؤثر در وقوع بارش‌های حدی، از اهمیت زیادی برخوردار است، از این جهت که بارش‌های شدید می‌تواند مسبب رخداد سیل و عواقب مصیبت بار پس از آن باشد. بارش تنها یک فرآیند حیاتی در چرخه‌ی هیدرولوژی جهانی نیست بلکه شاخص مهمی از تغییرات اقلیمی به‌شمار می‌رود (Fu et al., 2016). بارش از عناصر اقلیمی پیچیده در زمان و مکان است و الگوی آشفته‌ای دارد (Tan, Gan, Chen & Liu, 2019) و از این جهت در کشور ایران نیز، از تنوع زمانی و مکانی قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. با توجه به ارتباط نزدیکی که بین الگوهای گردش جوی و عناصر اقلیمی وجود دارد، می‌توان پدیده‌های فرین اقلیمی، مانند سیل و ترسالی‌ها را به تغییراتی که در الگوهای گردش جوی به وجود می‌آید، نسبت داد (Babaee & Fattahi, 2014). یکی از سیستم‌های سینوپتیک که موقعیت، شرایط استقرار و ویژگی‌های دینامیکی آنها در وضعیت اقلیم یک منطقه و ایجاد شرایط ترسالی و یا خشکسالی هر منطقه، اثرگذار می‌باشد، رودبادها به ویژه رودباد جنب‌حاره هستند. با بررسی و شناسایی فعل و انفعالات ترازهای فوقانی وردسپهر به خصوص رودبادها و بطور أخص رودباد جنب‌حاره‌ای و نوسانات دوره‌ای و موقعیت آن در دوره‌های ترسالی و خشکسالی، می‌توان اثرات مثبت و منفی آن‌ها را در هر سال را قضاوت کرد. پژوهش‌های متعددی در سطح جهان و ایران انجام شده است که نشان داده‌اند موقعیت مکانی – زمانی رودبادهای جنب‌حاره بر اغلب ترسالی‌ها اثرگذار هستند.

از مطالعاتی که در این زمینه انجام شده است، می‌توان به بررسی‌های دگیرمندزیک و ویبگ (Degirmendžić & Wibig, 2007)، سیدل و همکاران (Seidel, Fu, Randel & Reichler, 2008)، آرچر و کالدریا (Archer & Caldeira1, 2008)، هادسن (Hudson, 2012)، آبیش و همکاران (Abish, Joseph & Johannessen, 2015) اشاره کرد. هورینوچی و هایاشی (Horinouchi & Hayashi, 2017) رابطه بین موقعیت رودباد جنب‌حاره‌ای با بارش تابستانه در شرق آسیا را مطالعه کرده و نشان دادند که بارش‌ها در فصل تابستان، بر فراز مناطق ساحلی شرق چین که با رودبادهای لحظه‌ای همراه است، بیشتر است.

یوکویاما و همکاران (Yokoyama, Takayabu & Horinouchi, 2017) دریافتند که رودباد جنب‌حاره محیط‌های مطلوبی را برای سیستم‌های بارشی سازمان‌یافته بر روی شرق آسیا تا شمال غربی اقیانوس آرام معروف به باند باران[1] تولید می‌کند. زولوتو و همکاران (Zolotov, Ippolitov & Loginov, 2018) در بررسی موقعیت جریان رودباد جنب‌حاره در طول دوره‌ی ۶۰ ساله (۲۰۱۷-۱۹۵۸) بر فراز اقیانوس اطلس شمالی، نشان دادند که رودباد جنب‌حاره در طی دوره‌ی آماری، با یک درجه جابه‌جایی به سمت قطب در فصل تابستان، سرعت آن ۱ متر بر ثانیه افزایش داشته است؛ در حالی‌که با جابه‌جایی به سمت استوا در فصل زمستان، سرعت آن ۳ متر بر ثانیه افرایش یافت. اسیری و همکاران (Asiri, Almazroui & Awad, 2020) نشان دادند که جریان رودبادی در بیش از ۸۷٪ مواقع در سطح فشار ۲۰۰ هکتوپاسکال واقع شده است. هانت و زاز (Hunt & Zaz, 2023) در بررسی ارتباط نوسانات اقیانوس اطلس شمالی با بارش زمستانی بر فراز هیمالایای غربی از طریق ناهنجاری‌های جریان رودبادی جنب‌حاره مورد نشان دادند که در طول مراحل مثبت نوسان اقیانوس اطلس شمالی (NAO+)، تغییرات سرعت رودباد جنب‌حاره ۲۰٪ رایج‌تر و ۷٪ شدیدتر از فازهای منفی (NAO-) است. علیجانی و همکاران (Alijani, Khosravi & Esmailnejad, 2011) در تحلیل همدید بارش سنگین جنوب‌شرق ایران نشان دادند که وجود رطوبت زیاد در تراز پایین جو بخصوص تخلیه رطوبتی شدید از خلیج فارس، ناهنجاری‌های منفی شدید در ترازهای میانی جو و استقرار رودباد جنب حاره‌ای در غرب منطقه، در این رخداد نقش بسزایی داشتند. عزیزی و همکاران (Azizi, Nayeri & Rostami Jalilian, 2009) در تحلیل سینوپتیکی بارش سنگین در منطقه غرب کشور نشان دادند که سیستم کم فشار دریای مدیترانه

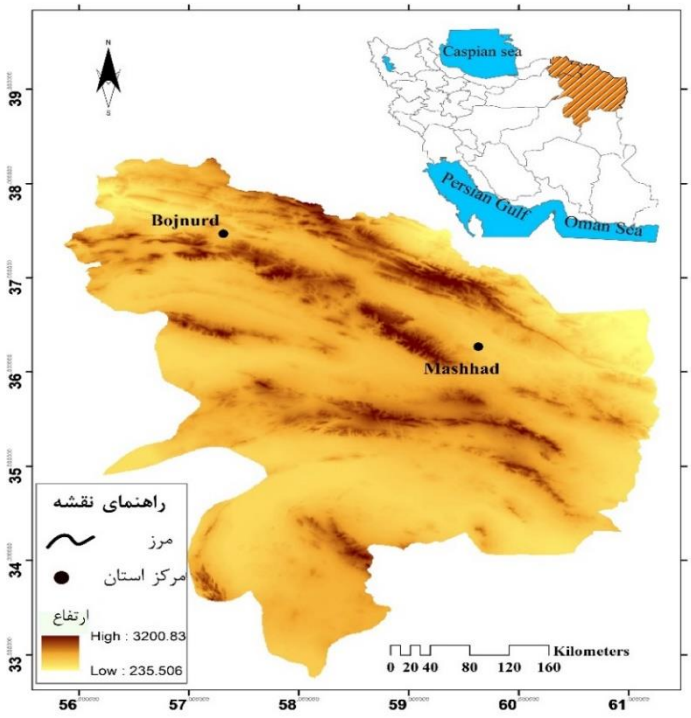
1- Rainband

و زبانه‌ی کم فشار سودانی در بارندگی‌های منطقه نقش داشته‌اند. ابراهیمی‌نیک (Ebrahimi Nick, 2012) در یکی از نتایج خود، بهترین ارتفاع مؤثر رودباد را ترازهای ۳۰۰ تا ۲۰۰ هکتوپاسکال شناسایی کرد. دارند (Darand, 2015) در بررسی و واکاوی بسامد رخداد رودبادها هنگام بارش‌های سیل‌آسای استان کردستان نشان داد که به هنگام رخداد بارش‌های سنگین در فصل مرطوب، بیشترین شار همگرایی رطوبت در ترازهای زیرین جو ۱۰۰۰، ۹۲۵ و ۸۵۰ هکتوپاسکال رخ داده است. روشن و قانقرمه (Roshan & Ghanghermeh, 2015) دریافتند که دو مؤلفه سرعت رودباد و موقعیت مرکزی هسته، نقش مؤثرتری نسبت به سرعت جابه‌جایی شمالی- جنوبی هسته بر کنترل بارش‌های ایران دارند. محمدی و لشکری (Mohammadi & Lashkari, 2018) دریافتند که مناسب‌ترین موقعیت رودباد جنب‌حاره‌ای را برای تشدید ناپایداری‌های منطقه جنوب و جنوب‌غرب ایران، لایه‌ی زیرین، محدوده‌ای بین مصر تا غرب خلیج فارس می‌باشد. زکی‌زاده و همکاران (Zaki Zadeh, Saligheh, Nasserzad & Akbari, 2018) نشان دادند که استقرار رودباد قوی با سرعت ۶۵ متر بر ثانیه در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال در جنوب ایران به همراه ناوه سرد چالی بر روی دریای خزر، موجب ریزش باران فراگیر در ایران شده است. محمدی و همکاران (Mohammadi, Alijani & Omar Saleh, 2019) در بررسی اقلیم‌شناسی رودبادها در خاورمیانه دریافتند که از نظر زمانی و مکانی تغییرات زیادی در فراوانی و سرعت رودبادها در طول سال به وجود می‌آید. به طوری‌که در دوره‌ی سرد سال فراوانی رودبادها و سرعت آن‌ها در عرض‌های جغرافیایی ۲۰ تا ۳۰ درجه‌ی شمالی بیشینه است و در دوره‌ی گرم فراوانی و سرعت آن‌ها در مناطق ذکر شده کاهش یافته و به عرض‌های ۳۵ تا ۴۵ درجه‌ی عرض شمالی منتقل می‌شوند. سینائی و همکاران (Sinaei, Saligheh & Akbari, 2022) نشان دادند که عامل اصلی ناپایداری بارش‌های حدی جنوب‌غرب کشور رودباد جنب‌حاره است و دریاهای سرخ، عمان، عرب و خلیج فارس نقش مهمی در تامین رطوبت بارش‌های منطقه داشتند. در نتایج بدست آمده از پژوهش کیخسروی و همکاران (Keikhosravi, Shakiba & Hamidpour, 2022)، مناسب‌ترین موقعیت هسته رودباد جنب‌حاره برای ایجاد بارش‌های فوق سنگین در حوضه‌ی کرخه، در مرکز کشور عربستان است. درستکار و همکاران (Dorostkar, Lashkari & Mohammadi) در بررسی نقش رودباد جنب‌حاره‌ای در ترسالی‌های جنوب غرب ایران دریافتند که جریان رودبادی جنب‌حاره با گرایشی نصف‌النهاری سبب تزریق تاوایی مناسب به سامانه‌های بارشی وارد شده به منطقه شده است. بنی نعیمه و همکاران (Bani Naeimeh, Lashkari, Ghorbanian & Morshedi, 2023) نشان دادند که گسترش ناوه عمیق در لایه میانی وردسپهر بر روی غرب آسیا و انطباق این ناوه با رودباد جنب‌حاره در لایه بالایی وردسپهر، سبب ناپایداری‌های شدید در حوزه آبریز دز شده است. در زمینه تأثیرات موقعیت استقرار جریان رودبادی جنب‌حاره بر ایجاد شرایط ترسالی در شمال شرق ایران و همچنین الگوهای همدیدی غالب در ایجاد شرایط فوق، پژوهش جامعی صورت نگرفته است. از این جهت، هدف این مطالعه، تعیین بهترین موقعیت استقرار و الگوی کشیدگی رودباد جنب حاره‌ای در شرایط ترسالی و مشخص کردن الگو یا الگوهای همدیدی غالب در چنین شرایطی در شمال‌شرق ایران می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه

محدوده‌ی مطالعاتی این پژوهش مشتمل بر دو استان خراسان شمالی و خراسان رضوی می‌باشد که در محدوده‌ی عرض ۳۰ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۷ دقیقه شمالی و طول ۵۵ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی واقع شده است. این منطقه از کشور، بی‌نظمی زیادی در توزیع بارش دارد. توزیع ناهمگن بارش از نظر زمانی، مکانی و مقدار در ایستگاه‌های منطقه به چشم می‌خورد. از نظر توزیع زمانی، بیشترین میزان بارش مؤثر در منطقه‌ی شمال‌شرق ایران در انتهای فصل زمستان و آغاز فصل بهار در گستره‌ی ماه‌های مارس، آوریل و می رخ می‌دهد (Ahmadi & Fallah Qalheri, 2015). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پست‌ترین نقطه دارای ارتفاع ۲۳۸ متر و مرتفع‌ترین مناطق دارای ارتفاع ۳۳۰۵ متر می‌باشند. در شمال‌شرق ایران، بی‌نظمی زیادی از نظر توزیع زمانی، مکانی و مقدار در بارش وجود دارد. از نظر توزیع زمانی، بیشترین میزان بارش مؤثر در منطقه‌ی شمال‌شرق ایران در انتهای فصل زمستان و آغاز فصل بهار در گستره‌ی ماه‌های

مارس، آوریل و می رخ می‌دهد (Ahmadi & Fallah Qalheri, 2015). ایستگاه‌های قوچان و بجنورد با بیشترین تعداد روزهای تر همراه با بارش سنگین، پرباران‌ترین ایستگاه‌ها و ایستگاه سبزوار با کمترین تعداد روزهای تر توأم با بارش سنگین، به عنوان کم‌باران‌ترین ایستگاه در منطقه شناسایی شدند (Bijandi, Daryabari, Ranjbar Saadat Abadi & Arbabisabzevari, 2022).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه شمال‌شرق ایران

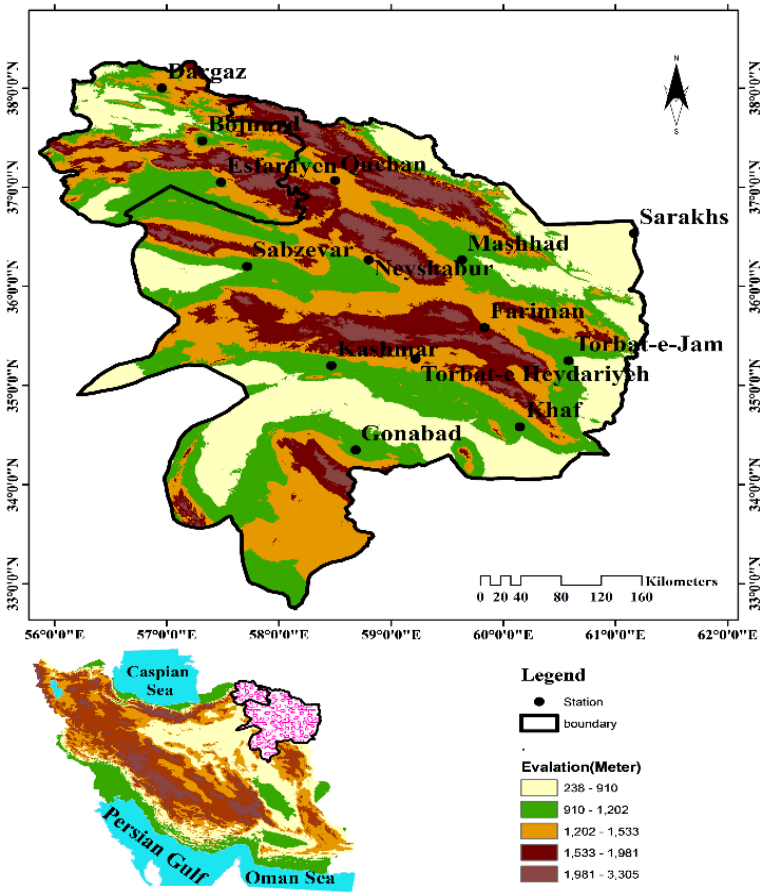
Fig. 1. Geographical Location the northeastern region of Iran

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، ایستگاه‌های همدید منطقه‌ی شمال‌شرق ایران مشتمل بر استان‌های خراسان شمالی و خراسان رضوی که در سه چرخه خورشیدی اخیر مشتمل بر چرخه ۲۲ (سال‌های ۱۹۸۶-۱۹۹۶) چرخه خورشیدی ۲۳ (سال‌های ۱۹۹۷-۲۰۰۷) و چرخه خورشیدی ۲۴ (سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۱۹) دارای داده‌های بارشی کامل بوده‌اند، انتخاب گردیده است. داده‌های بارش روزانه این ایستگاه‌ها از سازمان آب و هواشناسی کشور دریافت گردید. برای این که از بیشترین تعداد ایستگاه همدیدی برای استخراج ترسالی‌ها و خشکسالی‌ها و سامانه‌های بارشی استفاده شود، در هر چرخه خورشیدی یک ایستگاه، که دارای آمار ثبت شده کامل بود به عنوان یک ایستگاه عضو انتخاب گردید. به همین دلیل تعداد ایستگاه‌های عضو از چرخه اول تا چرخه سوم متفاوت بوده و افزایش یافته است. هدف از انتخاب سه چرخه خورشیدی اخیر انطباق دوره آماری با چرخه‌های خورشیدی سه‌گانه است. ولی در این تحقیق اثر لکه‌های خورشیدی بر خشکسالی یا ترسالی‌ها یا موقعیت جت جنب حاره‌ای بررسی نشده است. بلکه هدف فقط تناظر دوره‌های آماری با سیکل‌های خورشیدی بوده است تا در صورت همسویی دوره‌های خشک و تر با بخشی از سیکل پرسش و زمینه تحقیقی برای این ارتباط و همسویی فراهم گردد. شکل ۲ موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب منطقه شمال‌شرق ایران را نشان می‌دهد.

در گام بعدی، با ملاک قرار دادن شاخص SPI با استفاده از نرم‌افزار DIP وضعیت ایستگاه‌ها در هر چرخه خورشیدی به لحاظ خشکی و مرطوبی مشخص شد. بدین منظور از میانگین بارش سالانه هر ایستگاه استفاده گردید. جدول ۱ یک نمونه از خروجی DIP

از ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی در سیکل اول را نشان می‌دهد. براین اساس سال‌هایی که حداقل نصف ایستگاه‌های منتخب بر اساس شاخص فوق، ترسالی شدید را نشان دادند، به عنوان سال نمونه انتخاب شدند (شکل ۳)



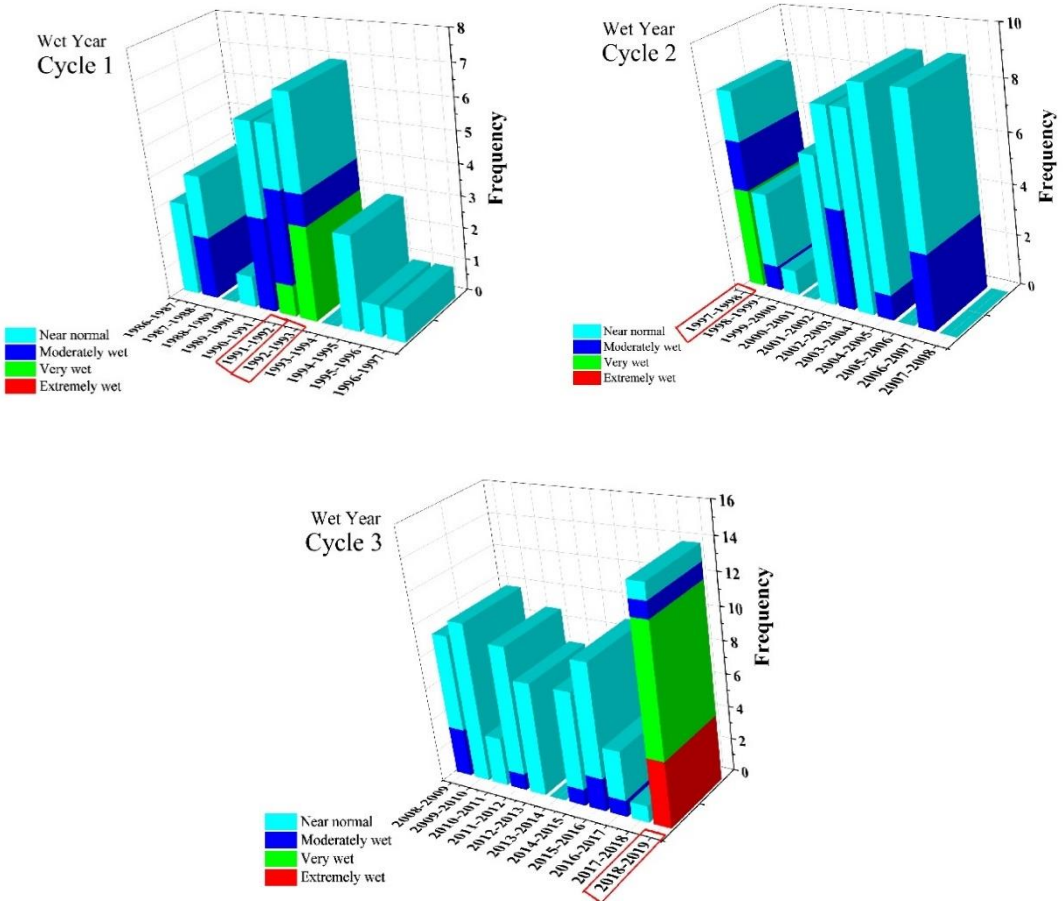
شکل ۲- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب منطقه شمال‌شرق ایران

Fig. 2. Geographical Location of selected synoptic stations in the northeastern region of Iran

جدول ۱- ایستگاه‌های درگیر با ترسالی بر اساس نتایج شاخص SPI در شمال‌شرق ایران

Table 1- Stations affected by wet based on SPI index results in northeastern of Iran

سال زراعی	ایستگاه	شاخص SPI	شدت خشکسالی
1992-93	بجنورد Bojnord	0.1	Near normal
1992-93	مشهد Mashhad	1.71	Very wet
1992-93	قوچان Quchan	0.6	Near normal
1992-93	سبزوار Sabzevar	0.75	Near normal
1992-93	سرخس Sarakhs	1.86	Very wet
1992-93	تربت حیدریه Torbate- Heydarieh	1.96	Very wet



شکل ۳- فراوانی ایستگاه‌های درگیر با ترسالی در شمال‌شرق ایران بر اساس نتایج شاخص SPI **(** به تفکیک چرخه خورشیدی**)**

Fig.3. Frequency of stations involved with a wet year in the Northeast of Iran (in solar cycles)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، براساس چرخه‌های خورشیدی، ترسالی‌های شناسایی شده عبارتند از: ترسالی‌های چرخه اول (۱۹۹۲-۱۹۹۱ و ۱۹۹۳-۱۹۹۲)، ترسالی چرخه دوم (۱۹۹۷-۱۹۹۸) و ترسالی چرخه سوم (۲۰۱۸-۲۰۱۹). سپس، بارش‌های سنگین و فوق سنگین در ایستگاه‌های منطقه و بر اساس ترسالی‌های هر چرخه خورشیدی مشخص شدند. بر این اساس از کل روزهای بارشی در محدوده‌ی مطالعاتی، روزهای برابر یا بالاتر از صدک ۵۰ ام به عنوان روزهای دارای بارش سنگین در نظر گرفته شد. سپس داده‌های جوی این روزها مشتمل بر داده‌های مؤلفه‌ی باد مداری، مؤلفه‌ی باد نصف‌النهاری، ارتفاع ژئوپتانسیل در سطح ۲۵۰ هکتوپاسکال، فشار تراز دریا[1]، نم ویژه و امگا از تارنماهای مرکز ملی اقیانوس‌شناسی و محیط‌شناسی ایالات متحده آمریکا (NCEP/NCAR) و ECMWF برای ترازهای ۱۰۰۰، ۹۲۵، ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال در محدوده‌ی طول ۰ تا ۱۰۰ درجه شرقی و عرض ۰ تا ۶۵ درجه شمالی دریافت گردید. جهت شناسایی موقعیت مکانی محور و هسته‌ی رودباد جنب‌حاره در ترسالی‌های شدید شمال ایران، اسکریپتی نوشته و سپس در محیط نرم‌افزاری GRADS، اجرا و محور و هسته‌ی رودباد در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال ترسیم شد. از داده‌های فشار تراز دریا و ۱۰۰۰ تا ۸۵۰ هکتوپاسکال جهت منشأیابی سامانه‌های بارشی استفاده شده است.

1 - SLP

بدین ترتیب با بررسی چشمی بر روی نقشه‌های ترسیم‌شده از چینش و آرایش سامانه‌ها در لایه‌های زیرین و مرزی وردسپهر، الگوهای غالب در ترسالی‌ها شدید در منطقه‌ی مورد مطالعه انتخاب شدند. در مرحله‌ی بعد، داده‌های SLP برای نمونه‌های ترسالی هر چرخه أخذ و برای تحلیل عاملی از آنها استفاده شد؛ جهت شناسایی الگوی پرتکرار رودباد، روش تحلیل عاملی و معیار KMO و آزمون بارتلت در نرم‌افزار SPSS24 انجام گردید. مقدار KMO و بارتلت به دست آمده برای ترسالی‌های هر سیکل در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- آزمون kmo و بارتلت برای اطمینان از مناسب بودن داده‌ها برای تحلیل عاملی

Table 2- KMO and Bartlett tests to ensure that the data are suitable for factor analysis

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		**0.850**
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	161505.391
	df	1326
	Sig	0.000

با توجه به نتایج، مقادیر محاسبه شده‌ی آزمون بارتلت برای ترسالی‌های هر چرخه در سطح P<0.000 معنادار شده است و مقادیر kmo بیش از ۰/۸ ، نشان می‌دهد که داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب هستند. تحلیل عاملی با چرخش واریمکس برای ترسالی‌های شدید چرخه‌های خورشیدی در شمال‌شرق ایران نشان داد که ۹ عامل با پراش بالای یک، حدوداً ۹۱ درصد پراش داده‌ها را تبیین می‌کند، به طوری که عامل اول حدوداً ۳۵/۱۰ درصد از پراش داده‌ها را باعث می‌شود. در پایان برای انتخاب الگوهای همدید غالب از نقشه‌های تراز ۱۰۰۰ تا ۸۵۰ هکتوپاسکال استفاده گردید و با بررسی چشمی مکرر الگوهای همدیدی شناسایی و با الگوهای استخراجی از تحلیل عاملی مقایسه شده و الگوی نهایی انتخاب شد.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج تحلیل عاملی و سپس بررسی‌های مکرر و دقیق چشمی بر روی نقشه‌های همدیدی ترازهای ۱۰۰۰ تا ۸۵۰ هکتوپاسکال در روزهای بارشی سنگین و فوق سنگین منطقه، الگوی همدیدی (کم‌فشار سودانی) پرتکرارترین الگوی شناسایی شده در منطقه مورد مطالعه بوده است (جدول ۳). به طوری که در شدیدترین روزهای بارشی منطقه در هر سه چرخه خورشیدی، در ۲۶ مورد از مجموع ۵۹ مورد الگوهای همدیدی شناسایی شده، الگوی همدیدی کم‌فشار سودانی بوده و پس از آن الگوی همدیدی کم‌فشار سودانی/ واچرخند مهاجر است که در ۱۶ مورد از بارش‌های سنگین منطقه در هر سه چرخه‌ی خورشیدی شناسایی شد. بنابراین در این پژوهش، پس از تحلیل موقعیت جریان رودبادی جنب‌حاره در ترسالی‌های شدید شمال‌شرق ایران، یک نمونه از الگوی کم‌فشار سودانی مورد تحلیل قرار گرفته است.

تحلیل موقعیت مکانی رودباد جنب‌حاره در ترسالی‌های شمال‌شرق ایران

موقعیت هسته‌ها و موقعیت روزانه‌ی محور رودباد جنب‌حاره برای تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال برای تمام روزهای بارشی در ترسالی‌های شدید سه چرخه خورشیدی برای شمال‌شرق ایران ترسیم و با یکدیگر مقایسه شد. در تمامی روزهایی که بارش در ایستگاه‌ها ثبت شده، در برخی موارد هسته‌های رودباد در عرض‌های پایین‌تر جغرافیایی قرار داشته و محورها نیز از پهنه‌های جنوبی عبور کرده‌اند و در مواردی نیز انتهای محورها از مناطق شمالی ایران عبور کرده است. در این پژوهش، موقعیت هسته‌ها و محورها در مواردی که از

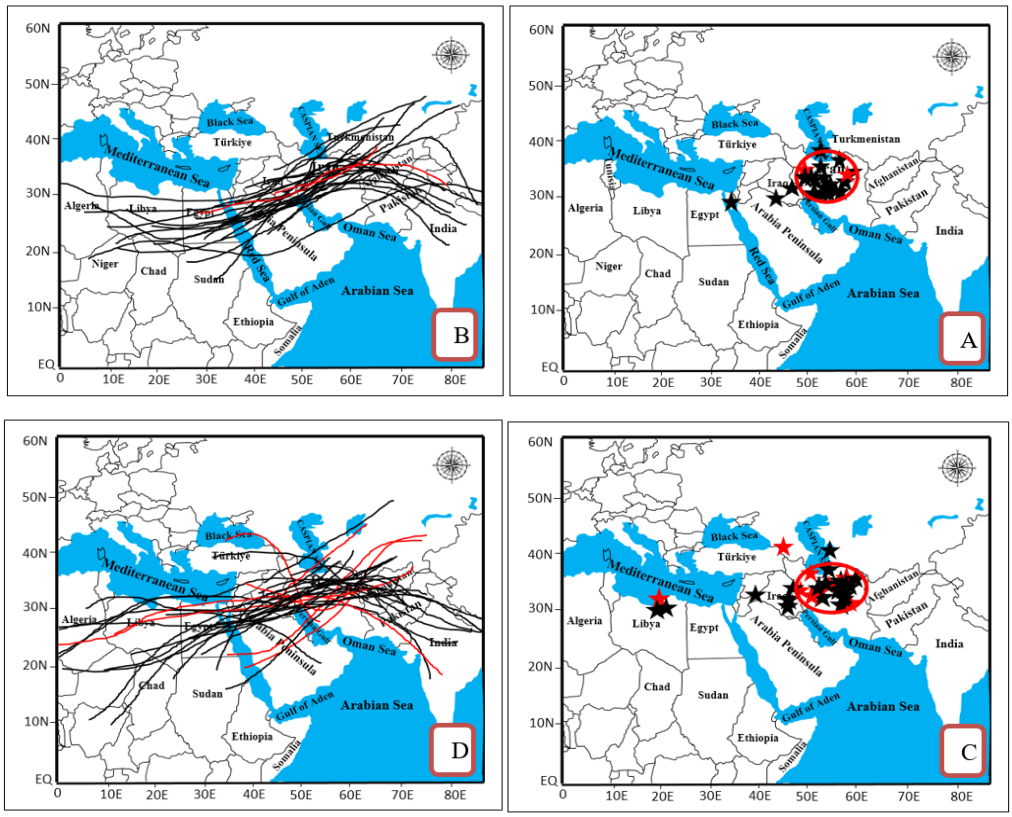
نیمه‌ی شمالی عبور کرده‌اند، بررسی شده است. سال‌های زراعی ۱۹۹۲-۱۹۹۱ و ۱۹۹۳-۱۹۹۲ ترسالی‌های استخراجی در چرخه خورشیدی اول می‌باشند.

جدول۳- مشخصات سامانه‌های بارشی ترسالی‌ها، شمال‌شرق ایران در چرخه‌های خورشیدی بر اساس صدک ۵۰

Table 3- Characteristics of the rainfall systems in wet years, the northeastern of Iran in three solar cycles based on the 50th percentile

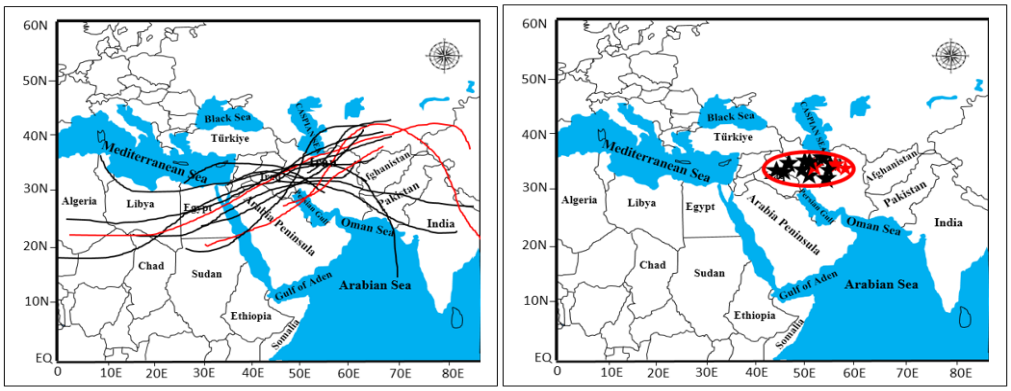
ردیف No	الگوهای همدیدی Synoptic Patterrns		
	چرخه اول Cycle 1	چرخه دوم Cycle 2	چرخه سوم Cycle 3
1	کم‌فشار سودانی Sudan Low Pressure	کم‌فشار سودانی Sudan Low Pressure	کم‌فشار سودانی Sudan Low Pressure
2	کم‌فشار سودانی/ مدیترانه Sudanie/Mediterranean	کم‌فشار سودانی/ چرخند مدیترانه Sudanie/Mediterranean	کم‌فشار سودانی/ چرخند مدیترانه Sudanie/Mediterranean
3	واچرخند مهاجر Migratory Anticuclone	واچرخند مهاجر Migratory Anticuclone	واچرخند مهاجر Migratory Anticuclone
4	کم‌فشار سودانی/ واچرخند سیبری Sudanie/ Siberian	کم‌فشار سودانی/ واچرخند سیبری Sudanie/ Siberian	کم‌فشار سودانی/ واچرخند سیبری Sudanie/ Siberian
5	کم‌فشار سودانی / واچرخند مهاجر Sudanie/ Migratory Anticuclone	کم‌فشار سودانی / واچرخند مهاجر Sudanie/ Migratory Anticuclone	کم‌فشار سودانی / واچرخند مهاجر Sudanie/ Migratory Anticuclone

شکل ۴ موقعیت هسته و محور رودباد را برای ترسالی‌های چرخه اول نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ترسالی ۹۲-۱۹۹۱ هسته‌های سرعت در روزهای بارشی در پهنه ای بین طول ۳۵ درجه تا ۵۸ درجه شرقی و عرض ۲۸ تا ۳۷ درجه شمالی استقرار داشته‌اند (شکل ۴A). بیشتر هسته‌ها در نواحی مرکزی ایران مستقر هستند. در این ترسالی تعداد روزهای با بارش‌های سنگین بر طبق معیار میانگین بارش بیش از ۵ میلی‌متر کمتر رخ داده است. بر روی نقشه موقعیت هسته‌ی رودباد در روزهای فوق با رنگ قرمز مشخص است. مجموع بارش در دور روز بارش سنگین ۱۰۴ میلی‌متر بوده که از ۶ ایستگاه در منطقه مطالعاتی گزارش شده است. شدیدترین روز بارشی ۱۳ دسامبر ۱۹۹۱ با مجموع بارش ۷۰ میلی‌متر می‌باشد. هسته‌ی مرکزی رودباد در این روز بر روی استان همدان قرار داشت و محور رودباد با راستای جنوب‌غربی – شمال‌شرقی در طول شرقی ۴۰ درجه تا ۶۳ درجه، از غرب عراق تا شمال‌شرق ایران و ترکمنستان گسترش یافته است. در ترسالی ۱۹۹۳-۱۹۹۲ هسته‌های سرعت پهنه‌ای بین ۲۰ درجه تا ۶۰ درجه طول شرقی و ۲۸ تا ۴۰ درجه عرض شمالی استقرار داشتند که در مقایسه با ترسالی ۹۲-۱۹۹۱ پراکندگی بیشتری داشتند، ولی در محدوده‌ی کرمانشاه تا خراسان رضوی و از نواحی داخلی ایران تا جنوب دریای خزر متمرکز شده‌اند (شکل۴C). در ترسالی فوق، تعداد روزهایی که بارش شدید گزارش شده است نسبت به ترسالی ۹۲-۱۹۹۱ بیشتر بوده و در ۹ مورد بارش بیش از ۵۲۰ میلی‌متر ثبت شد. شدیدترین روزهای بارشی در این ترسالی ۵ فوریه ۱۹۹۳ با مجموع ۱۲۶ میلی‌متر و ۸ می ۱۹۹۳ با مجموع ۱۰۸ میلی‌متر که از ۶ ایستگاه منطقه به ثبت رسید. در روزهای فوق هسته‌ی سرعت به‌ترتیب بر روی خراسان رضوی، شمالی و لرستان مستقر بود. در هر دو ترسالی تمرکز هسته‌ها بر روی منطقه مطالعاتی بر روی بارش‌های منطقه تأثیر داشتند. محور رودبادها در هر دو ترسالی بندرت گرایش مداری داشته و با کشیدگی زیاد از شمال افریقا تا آسیای میانه و در مواردی تا پاکستان و هند قرار گرفتند و پس از عبور از شمال‌شرق صحرای افریقا، از روی دریای سرخ و شمال عربستان امتدادی نصف النهاری پیدا کرده و در محدوده‌ی جنوب‌غرب تا کرمانشاه وارد ایران شده‌اند؛ ولی تمرکز محورها در محدوده شمال استان کرمانشاه تا کردستان بیش از سایر بخش‌ها بوده است. در چرخه‌ی دوم خورشیدی (۱۹۹۷-۲۰۰۸) یک ترسالی در شمال‌شرق شناسایی شد. ترسالی ۱۹۹۸-۱۹۹۷ تنها ترسالی استخراجی از چرخه‌ی دوم می‌باشد. شکل ۵ موقعیت هسته‌ها و محورهای رودباد جنب حاره را برای این ترسالی نشان می‌دهد.



شکل ۴- مراکز هسته و محورهای رودباد جنب‌حاره در ترسالی‌های شمال‌شرق ایران، تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال، چرخه اول؛ (A وB) ترسالی ۱۹۹۱-۱۹۹۲؛ (C و D) ترسالی ۱۹۹۳-۱۹۹۲

Fig. 4. Core centers and axes of the SJS in wet years of the Northeast of Iran, 250 hPa level, the first cycle; (A and B) wet year of 1991-1992; (C and D) wet year of 1992-1993



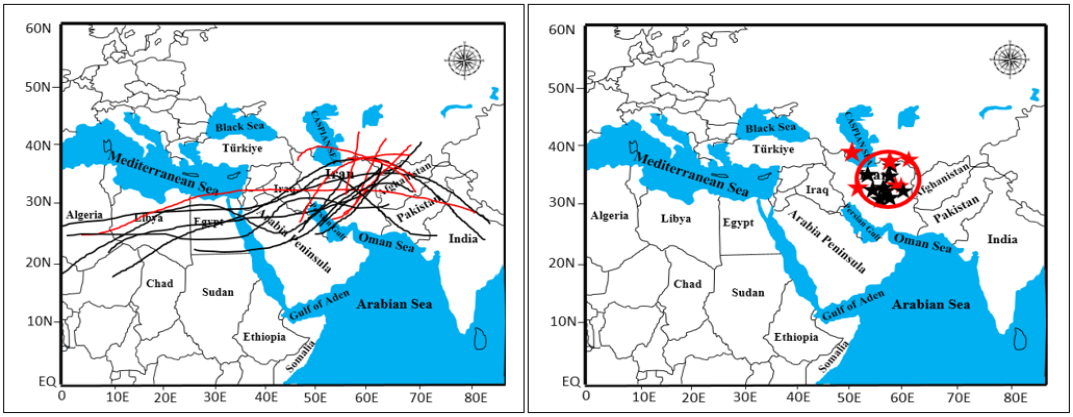
شکل ۵- مراکز هسته و محورهای رودباد جنب‌حاره در ترسالی شمال‌شرق ایران، تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال، چرخه دوم(۱۹۹۷-۱۹۹۸)

Fig. 5. Core centers and axes of the SJS in wet years of the Northeast of Iran, 250 hPa level, the second cycle (1997-1998)

همان‌طور که مشاهده می‌شود تمامی هسته‌های رودباد در روزهای بارشی بصورت همگن و متمرکز در طول ۴۲ درجه تا ۶۰ درجه شرقی و عرض ۳۲ درجه تا ۳۶ درجه شمالی در محدوده‌ی مرکز عراق تا استان سمنان قرار گرفتند.

در این ترسالی ۵ مورد بارش شدید براساس معیارهای ذکر شده و با مجموع بارش ۳۶۳ میلی‌متر از ۹ ایستگاه گزارش شده است که بر روی نقشه، محورها و هسته‌های سرعت رودباد در این روزها با رنگ قرمز متمایز شده است؛ همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هسته‌های مرکزی رودباد به ویژه در شدیدترین روزهای بارشی، در محدوده‌ی قزوین و استان سمنان استقرار داشت. همچنین شدیدترین روز بارشی ۶ ژانویه ۱۹۹۸ با مجموع بارش ۱۱۳ میلی‌متر می‌باشد که در این روز هسته‌ی مرکزی رودباد جنب‌حاره با سرعت بیش از ۶۰ متر بر ثانیه بر روی بجنورد و شیروان قرار داشت و محور رودباد با راستای جنوب‌غربی – شمال‌شرقی ا ز شمال سودان تا آسیای میانه و سپس هندوستان گسترش یافته و گرایشی کاملا نصف‌النهاری داشته است. هسته‌های رودباد در این ترسالی در مقایسه با ترسالی‌های چرخه اول متمرکزتر بوده و پراکنده نبوده‌اند و موقعیت استقرار آنها ۴ درجه به سمت عرض‌های بالاتر جابجا شده است. در این ترسالی نیز همانند ترسالی‌های چرخه اول، بیشتر هسته‌های مرکزی رودباد در عرض‌های پایین‌تر استقرار داشتند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، محورهای رودباد در تمامی موارد گرایشی نصف‌النهاری داشتند و با کشیدگی زیاد از شمال صحرای افریقا تا هند گسترش یافتند. محورها از شمال خوزستان تا کرمانشاه وارد ایران شده ولی در محدوده‌ی زنجان تا سمنان متمرکز بودند.

در چرخه‌ی سوم خورشیدی در شمال‌شرق ایران ترسالی (۲۰۱۸-۲۰۱۹) شناسایی شد (شکل ۶). در این ترسالی با وجود تعداد کم روزهای بارشی، ولی بارش‌های شدید با میانگین بیش از ۱۰ میلی‌متر، بیشتر از ترسالی‌های چرخه‌های اول و دوم بود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هسته‌های مرکزی رودباد به صورت همگن و متمرکز در طول شرقی ۴۸ درجه تا ۶۰ درجه و عرض شمالی ۳۳ درجه تا ۴۰ درجه و در محدوده‌ی شمال‌شرق ایران قرار دارند. در این ترسالی ۷ روز توأم با بارش‌های شدید با مجموع بارش بیش از ۹۷۰ میلی‌متر ثبت شد که نسبت به ترسالی‌های چرخه اول و دوم مقادیر بارش بیشتر بوده است؛ شدیدترین روز بارشی ۱۴ آوریل ۲۰۱۹ با مقدار ۱۸۷ میلی‌متر که از ۱۴ ایستگاه منطقه مطالعاتی گزارش شد. در این روز هسته‌ی مرکزی رودباد با سرعتی بیش از ۳۵ متر بر ثانیه بر روی خراسان شمالی مستقر بود. در مقایسه با ترسالی‌های چرخه اول و دوم، در ترسالی چرخه سوم هسته‌های رودباد پراکنش نداشته و کاملاً بر روی شمال‌شرق ایران مستقر بودند که تأثیر زیادی بر شدت بارش‌های منطقه داشته است. محورهای رودباد با کشیدگی زیاد از محدوده‌ی شمال صحرای افریقا امتداد یافته و پس از عبور از دریای سرخ گرایشی نصف‌النهاری پیدا کرده و تا آسیای میانه و هند گسترش یافتند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در شدیدترین روزهای بارشی محور رودبادها، که با رنگ قرمز مشخص شده است، در مقایسه با ترسالی‌های چرخه‌های گذشته، کوتاه‌تر و کاملاً نصف‌النهاری شده‌اند که این شرایط بیانگر افزایش سرعت هسته‌ی رودباد می‌باشد که به تبعِ آن شیوه فشاری افزایش یافته است.



شکل ۶- مراکز هسته و محورهای رودباد جنب‌حاره در ترسالی شمال‌شرق ایران، تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال، چرخه سوم (۲۰۱۹-۲۰۱۸)

Fig. 6. core centers and axes of the SJS in wet years of the Northeast of Iran, 250 hPa level, the third cycle (2018-2019)

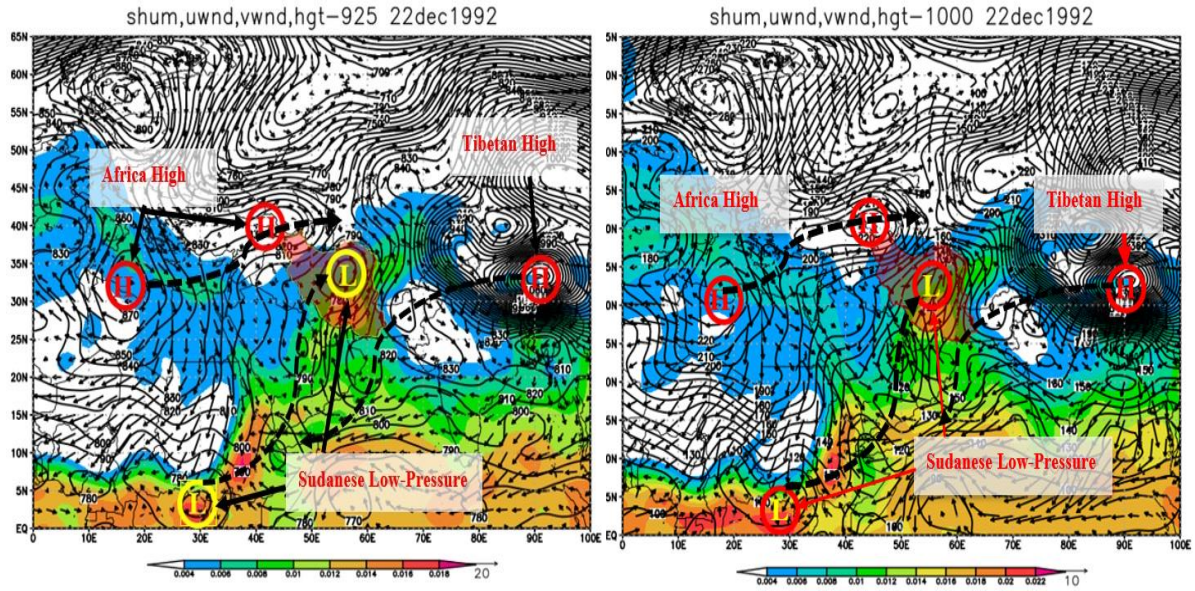
تحلیل همدیدی الگوی کم‌فشار سودان (سامانه نمونه این الگو ۲۲ دسامبر ۱۹۹۲)

برای تحلیل همدیدی سامانه‌ی غالب در ترسالی‌های شمال‌شرق ایران، از نقشه‌های ترکیبی (ارتفاع ژئوپتانسیل، جریان و نم ویژه) برای ترازهای ۱۰۰۰، ۹۲۵، ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال و همچنین نقشه‌های ترکیبی (ارتفاع ژئوپتانسیل، جریان و امگا) برای ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال استفاده شده است. در این الگو، کم‌فشار سودان نقش اساسی در تأمین بارش‌های سنگین شمال‌شرق ایران داشته است. این سامانه‌ی بارشی دو روز (۲۲ و ۲۳ دسامبر ۱۹۹۲) بر منطقه حاکمیت داشت. شکل‌های ۷ تا ۹ چینش سامانه‌ها را در ترازهای زیرین، مرزی و میانی وردسپهر در روز ۲۲ دسامبر ۱۹۹۲ نشان می‌دهد.

شکل ۷ ساختار و آرایش سامانه‌ها را در لایه‌های زیرین وردسپهر نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، کم‌فشار سودان در موقعیت همیشگی خود قرار گرفته و زبانه‌ای از آن در امتداد جنوب‌غربی –شمال‌شرقی بر روی شرق عربستان و نواحی شمال‌شرقی ایران مستقر شد. همزمان واچرخند شمال افریقا با گسترش شمال‌سو بر روی دریای مدیترانه قرار گرفته است و موجب فرارفت سرد عرض‌های شمالی به سمت عرض‌های جنوبی‌تر و پشت سامانه‌ی سودانی شده است. این فرارفت سرد، شیو دمایی را در دامنه‌ی غربی کم‌فشار سودان افزایش داده است. در عین حال زبانه‌ای از واچرخند تبت با گسترش جنوب‌سو بر روی دریاهای گرم عمان و عرب قرار گرفته است؛ با نفوذ هوای سرد بر روی آبهای گرم جنوب، به تدریج ناپایدار شده و رطوبت مناسبی در گردش ساعتگرد این واچرخند به دامنه‌ی شرقی کم‌فشار سودانی فرارفت می‌شود؛ در ادامه رطوبت فرارفت شده، از طریق جریانات جنوبی به نیمه‌ی شرقی ایران از جمله شمال‌شرق فرارفت شده است. میدان رطوبتی شکل گرفته در هر دو تراز ۱۰۰۰ و ۹۲۵ هکتوپاسکال بر روی استان هرمزگان و به مقدار ۱۴ تا ۱۶ گرم بر کیلوگرم در تراز ۱۰۰۰ و ۱۲ تا ۱۴ گرم بر کیلوگرم در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال، بیانگر این فرارفت رطوبتی از طریق واچرخند ثبت می‌باشد.

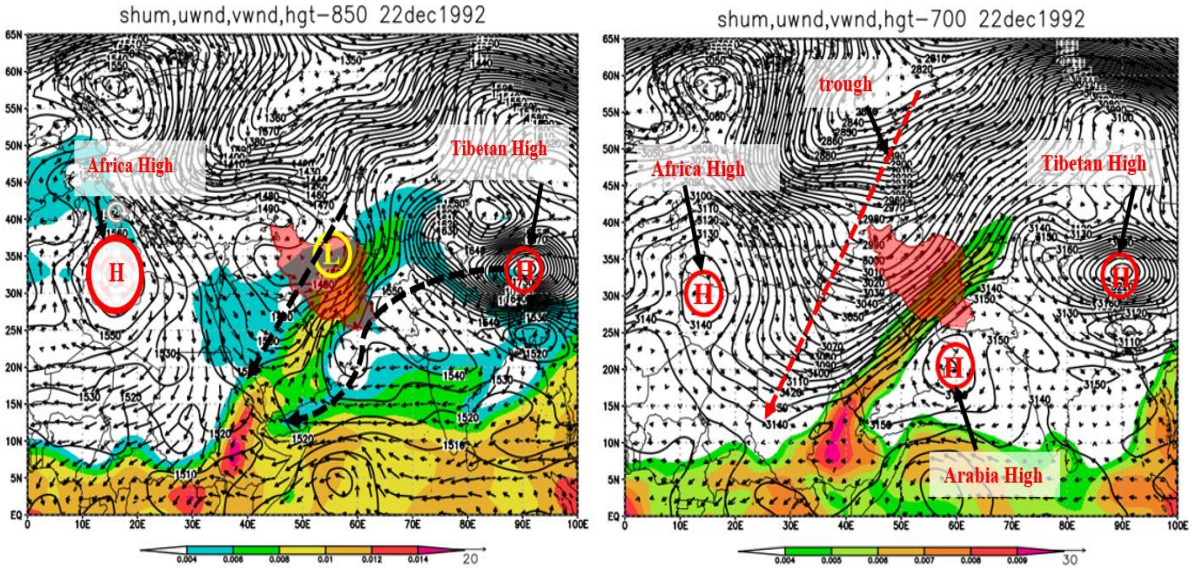
شکل ۸ ساختار سامانه‌ها را در ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد. در لایه‌ی مرزی، زبانه‌ای از کم‌فشار سودان به صورت هسته‌ی مستقل با منحنی ارتفاعی ۱۴۷۰ ژئوپتانسیل متر شمال‌شرق ایران استقرار یافته و تمام پهنه‌ی ایران تا سوریه را در بر گرفته است. این در حالی است که زبانه‌ای از پرفشار تبت در امتداد شمال‌شرقی – جنوب‌غربی به عرض‌های پایین‌تر گسترش یافت. پیشروی این زبانه واچرخندی بر روی دریاهای عمان، عرب و خلیج عدن سبب فرارفت گرم و مرطوب به درون کم‌فشار سودانی شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود رطوبت این دریاها از طریق جریانات جنوبی به جلوی کم‌فشار سودان و در ادامه به مناطق شرقی و شمال‌شرقی ایران فرارفت می‌شود. هسته‌ی مرکزی واچرخند شمال افریقا در این تراز کاملا بر روی دریای مدیترانه استقرار یافت که موجب ریزش هوای سرد عرض‌های شمالی بر پشت سامانه سودانی شده است.

فرارفت سرد از طریق جریانات شمالی به پشت سامانه‌ی سودانی و فرارفت گرم و مرطوب از طریق جریانات جنوبی به دامنه‌ی شرقی آن سبب تقویت این سامانه شده و سبب تشکیل هسته‌ی رطوبتی به بزرگای ۱۴ گرم بر کیلوگرم بر روی کشور اتیوپی شده است که از طریق کانال رطوبتی به جنوب تا شمال‌شرق ایران منتقل شده است. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال واچرخند شمال افریقا با جابجایی جنوب‌سو بر روی کشور لیبی قرار گرفته و تضعیف شده است؛ در حالیکه واچرخند عربستان با توجه به دور شدن از واداشت‌های سطحی، در این تراز تظاهر یافته است؛ هسته‌ی مرکزی این واچرخند با منحنی ارتفاعی ۳۱۷۰ ژئوپتانسیل متر در جنوب شبه جزیره عربستان و بر روی آبهای دریای عرب شکل گرفت. در عین حال ناوه‌ای عمیق از جنوب دریای سیاه با راستای شمال‌شرقی –جنوب‌غربی بر روی کشورهای عراق، عربستان تا شمال سودان و جنوب دریای سرخ تا عرض ۱۲ درجه گسترش یافت. ریزش هوای سرد عرض‌های شمالی از طریق ناوه به سمت عرض‌های گرم جنوبی، شیو دمایی را بر روی دریای سرخ و مرکز عربستان تشدید کرده است. در این حالت جنوب، جنوب‌شرق و شمال‌شرق ایران در جلوی ناوه و بیشترین ناپایداری‌ها قرار گرفته است. رطوبت فرارفت شده به جلوی ناوه و در ادامه به منطقه مطالعاتی از طریق گردش ساعتگرد واچرخند عربستان که در جایگاه مناسبی بر روی آبهای دریای عرب قرار گرفته است، و همچنین دریای سرخ تأمین می‌شود.



شکل ۷- ارتفاع ژئوپتانسیل (کانتور)، میدان باد (بردار) و نم ویژه (سایه‌دار)، ترازهای ۱۰۰۰ و ۹۲۵ هکتوپاسکال، ۲۲ دسامبر ۱۹۹۲، شمال‌شرق

Fig. 7. Geopotential height (contour), wind field (vector) and specific humidity (shaded) at 1000 & 925 hPa levels on December 22, 1992

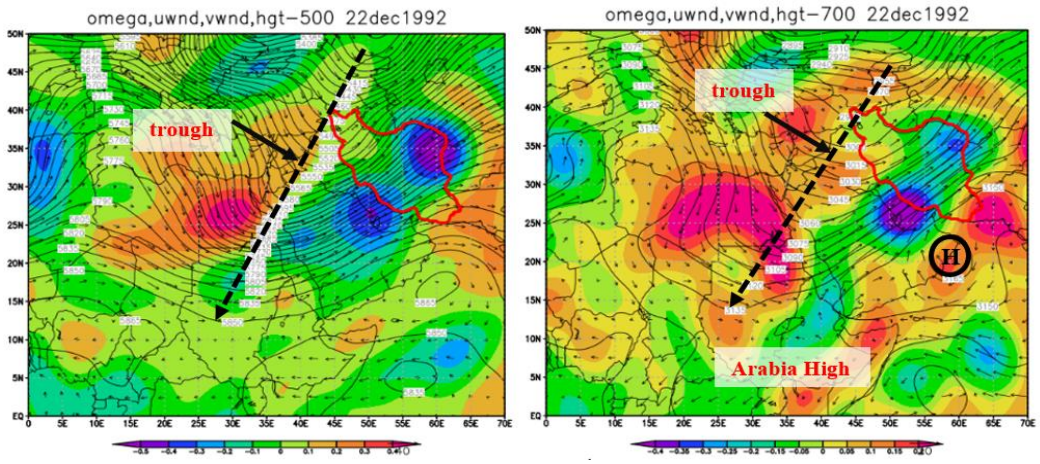


شکل ۸- ارتفاع ژئوپتانسیل (کانتور)، میدان باد (بردار) و نم ویژه (سایه‌دار)، ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال، ۲۲ دسامبر ۱۹۹۲، شمال‌شرق

Fig. 8. Geopotential height (contour), wind field (vector) and specific humidity (shaded) at 850 & 700 hPa levels on December 22, 1992

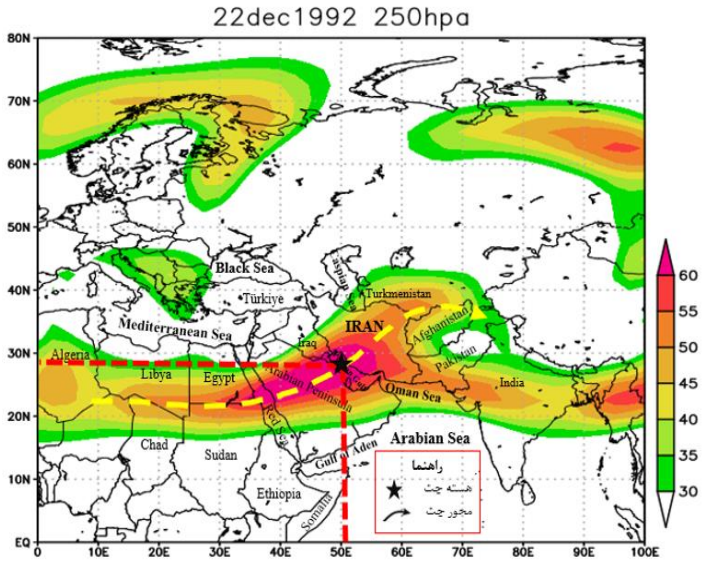
شکل ۹ نقشه امگا در ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال را در روز ۱۳ دسامبر ۱۹۹۱ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل فوق مشاهده می‌شود در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ناوه‌ی عمیق با راستای شمالی – جنوبی از عرض ۵۰ درجه شمالی تا عرض‌های پایین‌تر (۱۲ درجه شمالی) گسترش یافته است. فرارفت سرد در این تراز به سمت عرض‌های جنوبی شیو حرارتی را در شمال عربستان و جنوب ایران تشدید کرده کرده است؛ همچنان که هسته‌ی سرعت رودباد جنب‌حاره‌ای در مناطق فوق استقرار داشت. وجود دو میدان امگای منفی با بزرگای ۰/۵- پاسکال بر ثانیه بر روی خلیج فارس و شمال‌شرق ایران نشان‌دهنده‌ی صعود شدید هوا در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال است. وجود جریانات بالاسوی قوی و فرارفت رطوبتی از لایه‌های زیرین شرایط را برای وقوع بارش‌های همدیدی فراهم کرده است. امگای منفی شدید بر روی منطقه مطالعاتی توجیه کننده‌ی وجود ناپایداری‌های شدید در منطقه است. این در حالی است که در تراز پایین‌تر (۷۰۰ هکتوپاسکال) میدان امگای منفی شدید با بزرگای ۰/۴- پاسکال بر ثانیه بر روی خلیج فارس و با شدت کمتر با بزرگای ۰/۳- پاسکال بر ثانیه بر روی خراسان رضوی ایجاد شده است.

شکل ۱۰موقعیت مکانی رودباد جنب‌حاره در روز ۲۲ دسامبر ۱۹۹۲ مشاهده می‌شود. در این روز جریانی از رودباد جنب‌حاره از شمال شرق صحرای افریقا امتداد یافته و پس از عبور از دریای سرخ گرایشی نصف‌النهاری پیدا کرده و از جنوب‌غرب وارد ایران و سپس در همان امتداد تا آسیای میانه گسترش یافته است. تمام پهنه‌ی ایران غیر از شمال‌غرب را دربرگرفته است.



شکل ۹– نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کانتور)، میدان باد (بردار) و امگا (سایه‌دار)، ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، ۲۲ دسامبر ۱۹۹۲، شمال‌شرق ایران

Fig. 9. Map of geopotential height (contour), wind field (vector) and omega (shaded) at 500 & 700 hPa levels on December 22, 1992



شکل ۱۰- نقشه‌ی رودباد، تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال، ۲۲ دسامبر ۱۹۹۲، شمال‌شرق ایران
Fig. 10. The SJS map at 250 hPa level on December 22, 1992

بدین ترتیب بیشتر مناطق ایران از جمله شمال‌شرق، در زیر منطقه واگرایی هسته‌ی مرکزی رودباد با سرعت بیش از ۶۰ متر بر ثانیه بر روی دریای سرخ، مرکز عربستان تا استان‌های جنوبی ایران در طول ۳۸ درجه تا ۵۸ درجه شرقی و عرض ۲۱ درجه تا ۳۱ درجه شمالی استقرار دارد. مناطق فوق بر جلوی ناوه قرار دارند که نمایانگر ناپایداری شدید می‌باشد. همان‌طور که اشاره شد، محور رودباد در یک راستای جنوب‌غربی –شمال‌شرقی وارد شمال‌شرق ایران شده و انحنای نصف‌النهاری داشته است که این مسئله شرایط مساعدی جهت تشدید جریانات بالاسو و تقویت سامانه‌ی سودانی و همچنین ناپایداری‌های شدید ایجاد کرده است. این سامانه‌ی بارشی دو روز در شمال‌شرق ایران فعالیت داشت و ۹۷ میلی‌متر بارش در ۶ ایستگاه‌های منطقه به ثبت رشیده است.

نتیجه‌گیری

رودبادها یکی از سیستم‌های سینوپتیک می‌باشند که موقعیت مکانی، زمانی و شرایط استقرار آن در کنار ویژگی‌های دینامیکی‌شان بر وضعیت اقلیم یک منطقه از جمله دوره‌های تر و خشک هر منطقه تأثیر می‌گذارد. بر اساس نتایج پژوهش‌های محمدی و لشکری (Mohammadi & Lashkari, 2018) و ابراهیمی‌نیک (Ebrahimi Nick, 2012)، تراز مناسب جهت بررسی رودبادها، ترازهای ۳۰۰ تا ۲۰۰ هکتوپاسکال است. پژوهش حاضر با مرور مطالعات گذشته، تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال را مناسب‌ترین تراز برای بررسی موقعیت مکانی و زمانی رودباد جنب‌حاره در منطقه‌ی شمال‌شرق ایران شناسایی کرده است؛ و برای تمام روزها در سه چرخه‌ی خورشیدی (۲۲، ۲۳ و ۲۴) که سامانه‌ی بارشی وارد منطقه مطالعاتی شده‌اند، رودباد جنب‌حاره‌ای در تراز فوق مورد بررسی قرار گرفتند. در تمامی روزهایی که بارش‌های شدید در ایستگاه‌های منطقه ثبت شد، در برخی موارد جریان‌های رودبادی جنب‌حاره در عرض‌های پایین‌تر و جنوبی‌تر استقرار داشته و در مواردی نیز در عرض‌های جغرافیایی بالاتر و بر روی نیمه‌ی شمالی ایران قرار گرفتند. بهترین موقعیت استقرار جریان رودبادی جنب‌حاره برای ایجاد شرایط دینامیکی مناسب و ایجاد ناپایداری‌های شدید در منطقه شمال‌شرق ایران، در محدوده‌ی غرب ایران تا استان سمنان و جنوب دریای خزر قرار گیرد؛ و محور جریان رودبادی با گرایشی کاملاً نصف‌النهاری از مصر تا آسیای میانه امتداد یابد. در بررسی و تحلیل الگوهای همدیدی، از بین الگوهای همدیدی شناسایی شده در ترسالی‌های شدید شمال‌شرق ایران در چرخه‌های خورشیدی ذکر شده، الگوی کم‌فشار سودان، تأثیر بیشتری بر بارش‌های منطقه مزبور داشته

است. ساختار سامانه‌ها در این الگو به گونه‌ای بوده است که در ترازهای زیرین وردسپهر کم‌فشار سودانی با حرکت در راستای جنوب‌غربی –شمال‌شرقی بر روی شرق و شمال‌شرق ایران مستقر شده است؛ و همزمان واچرخند افریقا بر روی دریای مدیترانه قرار گرفته و ضمن فرارفت سرد عرض‌های شمالی بر پشت سامانه‌ی سودانی، شیو دمایی را در دامنه‌ی غربی کم‌فشار سودان افزایش داد. از طرفی، زبانه‌ی واچرخند تبت با گسترش بر روی دریاهای گرم عمان و عرب، رطوبت این دریاها را درون سامانه‌ی سودانی و در ادامه به شمال‌شرق ایران فرارفت می‌کند. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال و بالاتر نیز، وجود ناوه‌ای عمیق از شمال‌غرب ایران تا جنوب شبه جزیره عربستان، سبب شده است تا شمال‌شرق ایران در بازوی راست ناوه قرار گیرد؛ در عین حال واچرخند عربستان بر روی دریای عرب استقرار یافته و با گردش واچرخندی رطوبت این دریا را به جلوی ناوه فرارفت کند؛ در این حالت، شرایط مساعدی برای ایجاد بارش‌های همرفتی در شمال‌شرق ایران فراهم می‌گردد.

References

Abish, B., Joseph, P. V., & Johannessen, O. M. (2015). Climate Change in the Subtropical Jetstream during 1950–2009. *Advances in Atmospheric Sciences, 32,* 140–148. https://doi.org/10.1007/s00376-014-4156-6

Ahmadi, H., & Fallah Qalheri, G. A. (2015). Classification of agricultural climate in the north-east of Iran based on thermal and humidity conditions. *Agricultural Meteorology*, *3*(1), 67-81. [In Persian] https://www.agrimet.ir/article_54950.html

Alijani, B., Khosravi, M., & Esmailnejad, M. (2011). A synoptic analysis of January 6, 2008 heavy precipitation in the southeast of Iran. *Journal of Climate Research*, *1*(3-4), 3-14. [In Persian]

Archer, C. L., & Caldeira1, K. (2008). Historical trends in the jet streams. *Geophysical Research Letters, 35*, L08803. https://doi.org/10.1029/2008GL033614

Asiri, M. A., Almazroui, M., & Awad, A. M. (2020). Synoptic features associated with the winter variability of the subtropical jet stream over Africa and the Middle East. *Meteorology and Atmospheric Physics*, *132*, 819-831. https://doi.org/10.1007/s00703-019-00722-4

Azizi, G., Nayeri, M., & Rostami Jalilian, S. (2009). Synoptic analysis of heavy precipitation in west of Iran. *Journal of Physical Geography*, *1*(4), 1-13. [In Persian]

Babaee, O., & Fattahi, E. (2014). Synoptic Classification Models of Precipitation in the Coastel Areas of the Caspian Sea, Physical Geograghy Research, 46(1), 19-42. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2014.50617

Bani Naeimeh, S., Lashkari, H., Ghorbanian, J., & Morshedi, J. (2023). Synoptic analysis of extremely heavy rains and its effect on the peak discharge of Dez river floods (floods of 1993 and 2005). *Water and Soil Management and Modelling*, *3*(3), 37-55. [In Persian] https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11216.1107

Bijandi, M., Daryabari, S. J., Ranjbar Saadat Abadi, A., & Arbabisabzevari, A. (2022). Invegtigation of extreme precipitation events over northeastern Iran during the period 2001-2020. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, *4*(4), 284-307. [In Persian] https://www.ims-jmas.net/article_170989.html

Darand, M. (2015). Analysis of Jet Streams Frequency Occurrence during Heavy Precipitation over Kurdistan, Province. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *4*(1), 95-113. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geo.v4i1.33957

Degirmendžić, J., & Wibig, J. (2007). Jet stream patterns over Europe in the period 1950–2001–classification and basic statistical properties. *Theoretical and Applied Climatology*, *88*, 149-167. https://doi.org/10.1007/s00704-006-0237-5

Dorostkar, H., Lashkari, H., & Mohammadi, Z. (2023). Synoptic analysis of the role of the subtropical jet stream in wet of south west of Iran. *Journal of Climate Research*, *1402*(54), 1-18. [In Persian] https://clima.irimo.ir/article_178894.html

Ebrahimi Nick, M. (2012). The role of the location of the subtropical and polar winds on the wet and dry year of southwestern Iran. (Master's thesis). Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University. [In Persian]

Fu, Y., Chen, F., Liu, G., Yang, Y., Yuan, R., Li, R., ... & Sun, L. (2016). Recent trends of summer convective and stratiform precipitation in mid-eastern China. *Scientific Reports*, *6*(1), 33044. https://doi.org/10.1038/srep33044

Horinouchi, T., & Hayashi, A. (2017). Meandering subtropical jet and precipitation over summertime East Asia and the northwestern Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *74*(4), 1233-1247. https://doi.org/10.1175/JAS-D-16-0252.1

Hudson, R. D. (2012). Measurements of the movement of the jet streams at mid-latitudes, in the Northern and Southern Hemispheres, 1979 to 2010. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *12*(16), 7797-7808. https://doi.org/10.5194/acp-12-7797-2012

Hunt, K. M., & Zaz, S. N. (2023). Linking the North Atlantic Oscillation to winter precipitation over the Western Himalaya through disturbances of the subtropical jet. *Climate Dynamics*, *60*(7), 2389-2403. https://doi.org/10.1007/s00382-022-06450-7

Keikhosravi, G., Shakiba, A. R., & Hamidpour, P. (2022). Analysis of synoptic and thermodynamic patterns leading to extremely heavy rainfall and estimation of water area resulting from precipitation in Karkheh basin. *Geographical Studies of Coastal Areas Journal*, *1*(8), 83-100. [In Persian] https://journals.guilan.ac.ir/article_5572.html

Mohammadi, B., Alijani, B., & Omr Saleh, A. (2019). Climatology of Jet Streams in the Middle East. *Physical Geography Research*, *51*(2), 201-221. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2019.257049.1007216

Mohammadi, Z., & Lashkari, H. (2018). Effects of spatial movement of Arabia subtropical high pressure and subtropical Jet on synoptic and thermodynamic patterns of intense wet years in the south and south west Iran. *Physical Geography Research*, *50(*3), 491-509. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.249422.1007165

Roshan, G., & Ghanghermeh, A. (2015). The role of subtropical high pressure Jet Streams in controlling precipitation in Iran. *Geography and Environmental Planning*, *26*(3), 149-170. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20085362.1394.26.3.10.3

Seidel, D. J., Fu, Q., Randel, W. J., & Reichler, T. J. (2008). Widening of the tropical belt in a changing climate. *Nature Geoscience*, *1*(1), 21-24. https://doi.org/10.1038/ngeo.2007.38

Sinaei, H., Saliqe, M., & Akbari, M. (2022). Extreme precipitation and the role of jet streams - Case study: Southwestern Iran. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, *31*(121), 177-189. [In Persian] https://doi.org/10.22131/sepehr.2022.252777

Tan, X., Gan, T. Y., Chen, S., & Liu, B. (2019). Modeling distributional changes in winter precipitation of Canada using Bayesian spatiotemporal quantile regression subjected to different teleconnections. *Climate Dynamics*, *52*, 2105-2124. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4241-0

Yokoyama, C., Takayabu, Y. N., & Horinouchi, T. (2017). Precipitation characteristics over East Asia in early summer: Effects of the subtropical jet and lower-tropospheric convective instability. *Journal of Climate*, *30*(20), 8127-8147. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0724.1

Zaki Zadeh, M. B., Saligheh, M., Nasserzad, M. H., & Akbari, M. (2018). Statistical analysis and synoptic most effective jet stream pattern creating the precipitation of Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, *7*(15), 31-48. [In Persian] https://doi.org/10.22111/jneh.2017.3335

Zolotov, S. Y., Ippolitov, I. I., & Loginov, S. V. (2018). Characteristics of the subtropical jet stream over the North Atlantic from reanalysis data. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *211*(1), 012005. IOP Publishing. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/211/1/012005/meta

Vol.14, No.2, Summer 2025, p.21-44 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2025.91013.1531 OPEN ACCESS

Evaluation of the Efficiency of Multi-Layer Perceptron Neural Network in Predicting Dust Storms in the Persian Gulf Coasts (Abadan, Ahvaz and Bushehr climatic Stations)

Fatemeh Vatanparast Galeh Juq[1], Bromand Salahi[2]*

[1] PhD Student in Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

[2] Professor in Physical Geography, Department of physical Geography, Faculty of Social Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 29 November 2024

Revised: 06 April 2025

Accepted: 12 April 2025

Accepted Online: 12 April 2025

Keywords:

Dust Storm

Forecasting

Multilayer Perceptron (MLP)

SARIMA

HYSPLIT Trajectory Model

Persian Gulf Climate

ABSTRACT

Climate change, along with the subsequent occurrence of extreme events such as dust storms, not only disrupts the environment but also directly impacts human health and the natural course of life. In recent years, these events have had undesirable consequences in the agricultural sector. In this study, hourly dust data, average temperature, relative humidity, wind speed, and wind direction were collected from several stations along the Persian Gulf coast (Abadan, Ahvaz, and Bushehr) over a 37 year statistical period (1987–2023) to forecast and model dust storms. The number of days with dust storms was predicted on a seasonal scale using a multilayer perceptron neural network model and a seasonal SARIMA model. Based on the results of the multilayer perceptron neural network, the correlation coefficient between the observed and predicted values for the three synoptic stations Abadan, Ahvaz, and Bushehr was 0.43, 0.50, and 0.90, respectively, and the RMSE values were 6.96, 1.97, and 0.16, respectively. This model demonstrated lower error, higher correlation, and better predictive performance compared to the SARIMA model. Neural network forecasting for the next 16 years (2024–2040) indicated the highest probability of dust occurrence in spring and the lowest in autumn. Dust intensity was also found to be higher in Abadan than at the other stations during both the observational and future periods. Dust particle tracking using the HYSPLIT model and the backscatter method at three altitudes (200, 1000, and 1500 m) confirmed the generation of dust particles in Iraq, parts of Syria, and Saudi Arabia, as well as their movement toward western and southwestern Iran on common dates at the three stations. These results showed good agreement with dust optical depth, surface dust density, and the movement of the concentration mass as modeled by NAAPS and COAMPS. The findings of this study can contribute to the effective management of dust storm consequences and support programs aimed at combating desertification in the study areas.

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

How to cite this article: Vatanparast Galeh Juq, F., & Salahi, B. (2025). Evaluation of the Efficiency of Multi-Layer Perceptron Neural Network in Predicting Dust Storms at some Stations on the Persian Gulf Coast (Abadan, Ahvaz and Bushehr). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 14(2),* 21-44. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.91013.1531

©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

Healthy, pollution-free air is one of the most basic human needs, and among various pollutants, dust is considered one of the most significant air contaminants. Forecasting the risks associated with dust phenomena in affected areas and understanding their temporal and spatial variations are essential for risk preparedness and damage prevention. Neural networks are widely used forecasting tools and are increasingly applied in modeling dust storms.

Material and Methods

The data used in this study for forecasting dust storms include horizontal visibility measurements of less than 1 km and present weather codes indicating dust, along with seasonal time series data on average temperature, relative humidity, and wind speed and direction for the period 1987–2023 from three synoptic stations: Abadan, Ahvaz, and Bushehr.

Many methods have been developed for time series modeling and forecasting, making the selection of an appropriate method critical. In this study, a multilayer perceptron (MLP) neural network model was used to forecast the frequency of dust storms for the future period (2024–2040), and its results were compared with those of the seasonal ARIMA (SARIMA) model. To evaluate the forecasting performance of these models, Mean Squared Error (MSE), Root Mean Squared Error (RMSE), and the correlation coefficient (R) were used as evaluation criteria.

In the next step, to provide accurate information about the timing, location, intensity, and path of dust storms, the most significant factors influencing dust concentration and transport routes were analyzed. Because the studied stations experienced joint dust events on July 29, 2009; June 8, 2010; June 3, 2011; and March 11, 2012, the Lagrangian HYSPLIT model was used to track the trajectory of dust particles at three altitudes—200, 1000, and 1500 meters—at 6-hour intervals prior to dust entry, using the backward trajectory method. The output was then compared with results from the NAAPS and COAMPS models.

Results and Discussion

The correlation analysis between dust frequency and meteorological variables such as average relative humidity, temperature, wind speed, and direction revealed a direct and statistically significant relationship at all stations. This confirmed the feasibility of modeling and forecasting future values based on these variables.

Based on evaluation metrics, the MLP model exhibited lower error rates and higher correlation than the SARIMA model across all stations and was thus identified as the optimal forecasting model. Comparison of actual and predicted dusty days during the testing phase showed strong alignment, confirming the model's accuracy in estimating target values.

The analysis of seasonal dust variations at the studied stations during both the observation period (1987–2023) and the future period (2024–2040) revealed that all three stations experienced a higher frequency of dust storms in spring and a lower frequency in autumn—a trend consistent across both historical and projected data.

Routing analysis of dust events using the HYSPLIT model on shared dates indicated that the primary source of dust particles was a region spanning Iraq and parts of Turkey and Syria, with dust being transported to the study area. These findings were in good agreement with results from the NAAPS and COAMPS models, which tracked dust optical depth, surface dust density, and the movement of the concentration mass.

Conclusion

Dust is a highly variable phenomenon in terms of time, with its location and trajectory changing from hour to hour. The results of this study indicate that the longer the statistical period used for modeling dust storms, the more accurate the model predictions become.

From a practical standpoint, decision-makers and authorities can utilize these accurate models and forecasts to make timely, informed decisions before hazardous dust events occur. Implementing preventive measures at high-risk stations can help minimize or even avoid damage when such events take place.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۴۴-۲۱

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2025.91013.1531 دسترسی آزاد

ارزیابی کارایی شبکه عصبی پرسپترونی چندلایه در پیش‌نگری طوفان‌های گردوغبار سواحل خلیج فارس (ایستگاه‌های هواشناسی آبادان، اهواز و بوشهر)

فاطمه وطن‌پرست قلعه جوق[۱]، برومند صلاحی[2*]

[۱]دانشجوی دکتری آب‌وهوا شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
[۲]استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

کلمات کلیدی:

پیش‌بینی طوفان گردوغبار

شبکه عصبی پرسپترون چندلایه

مدل SARIMA

مدل مسیریابی HYSPLIT

اقلیم سواحل خلیج فارس

چکیده

تغییرات اقلیمی و به دنبال آن رخداد وقایع حدی نظیر طوفان‌های گردوغبار علاوه بر اختلال در محیط‌زیست، تأثیر مستقیم بر سلامت انسان و روند طبیعی زندگی داشته و طی سال‌های اخیر در بخش کشاورزی پیامدهای نامطلوبی را بر جای گذاشته است. در این پژوهش برای پیش‌نگری و مدل‌سازی طوفان‌های گردوغبار، داده‌های ساعتی گردوغبار، میانگین دما، رطوبت نسبی، سرعت و جهت باد در برخی از ایستگاه‌های سواحل خلیج فارس (آبادان، اهواز و بوشهر) با طول دوره آماری ۳۷ سال (۱۹۸۷-۲۰۲۳) گردآوری شد. پیش‌نگری تعداد روزهای همراه با طوفان‌های گردوغبار در مقیاس فصلی با استفاده از مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و مدل فصلی SARIMA انجام شد. براساس نتایج حاصل از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌نگری شده برای سه ایستگاه همدیدی آبادان، اهواز و بوشهر به ترتیب برابر با ۰/۴۳، ۰/۵۰ و ۰/۹۰ و مقدار RMSE برابر با ۶/۹۶، ۱/۹۷ و ۰/۱۶ بوده و نسبت به مدل SARIMA خطای کمتر، همبستگی بیشتر و عملکرد بهتری در پیش‌نگری داشته است. پیش‌نگری با شبکه عصبی برای ۱۶ سال آینده (۲۰۲۴-۲۰۴۰) بیشترین احتمال رخداد گردوغبار را در فصل بهار و کمترین مقدار را برای پاییز نشان داد. شدت گردوغبار نیز طی دوره‌های مشاهداتی و آینده در آبادان بیشتر از بقیه ایستگاه‌ها بوده است. مسیریابی ذرات گردوغبار با مدل HYSPLIT و به‌روش پسگرد در سه ارتفاع ۲۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متری، ایجاد ذرات گردوغبار در عراق، قسمت‌هایی از سوریه و عربستان و حرکت آن به سمت غرب و جنوب-غرب ایران را برای تاریخ‌های مشترک در سه ایستگاه تصدیق می‌کند و نتایج آن مطابقت خوبی را با عمق اپتیکی گردوغبار، تراکم گردوغبار سطحی و نحوه حرکت توده غلظت بر اساس مدل‌های NAAPS و COAMPS نمایش می‌دهد. نتایج این مطالعه می‌تواند در مدیریت پیامدهای ناشی از طوفان گردوغبار و برنامه‌های مقابله با بیابان‌زایی در مناطق تحت مطالعه مؤثر باشد.

*نویسنده مسئول: دکتر برومند صلاحی E-mail: salahi@uma.ac.ir

مقدمه

هوای سالم و بدون آلودگی یکی از اساسی‌ترین احتیاجات بشری است و در این میان گردوغبار یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های هوا به‌حساب می‌آید که باید در محیط درک و شناخته شود (Abdolshahnejad, Khosravi, Nazari Samani, Zehtabian & Alambaigi, 2020). درواقع گردوغبار از مهم‌ترین مخاطرات محیطی است که اثرات زیان‌باری بر محیط‌زیست، سلامت انسان، زیرساخت‌ها، کشاورزی، توسعه گردشگری و اقلیم دارد (Du et al, 2023; Ansari Ghojghar & Pourmohammad, 2025). ذرات ریز گردوغبار از عوامل مختلفی چون دما، اندازه و میانگین بارش، سرعت باد، رطوبت نسبی، ارتفاع، پوشش گیاهی، فشار هوا، ساختار خاک و کاربری اراضی متأثر شده و وارد جو می‌شود (Taghavi, Owlad, Safarrad & Irannejad, 2013; Karegar, Bodagh Jamali, Ranjbar Saadat Abadi, Moeenoddini & Goshtasb, 2017). ازاین‌رو مدل‌سازی این مخاطره در مناطق درگیر، یکی از نگرانی‌های پژوهشگران بوده و ارزیابی تغییرات، توزیع زمانی- فضایی و همچنین بررسی اثرات آن ضرورت دارد؛ به عبارت دیگر پیش‌نگری گردوغبار برای آمادگی در برابر خطرات و پیشگیری از خسارت‌های احتمالی آن لازم است. شبکه‌های عصبی یکی از روش‌های پرکاربرد در پیش‌نگری‌ها بوده است (Ansari Ghojghar, Pourgholam-Amiji, Bazrafshan, Liaghat & Araghinejad, 2020). همچنین از معروف‌ترین روش‌ها برای مدل‌سازی طوفان‌های گردوغبار است (Pourmaafi Esfahani, Almodaresi, Mousaei Sanjerehei & Hghparast, 2023). فعالیت طوفان‌های گردوغبار در سال‌های اخیر به مشکلات زیست‌محیطی مهمی در نواحی غرب و جنوب غربی ایران مبدل شده است. منشأ اولیه و اصلی رخدادهای گردوغبار در غرب ایران مرزهای غربی بین عراق، سوریه و شبه‌جزیره عربستان است (Fotouhi Firoozabad & Malekinejad, 2020; Mahmoudi & Ikegaya, 2023). با توجه به اینکه این پدیده اثرات نامطلوب و پیامدهای منفی در زمینه‌های اجتماعی، اقتصادی و سلامت مردم داشته مطالعه، پیش‌نگری و ارتباط سنجی آن با نوسانات اقلیمی ضروری است و باید نسبت به تعیین مناسب‌ترین مدل پیش‌نگری در شرایط این منطقه از ایران اهتمام ورزید. پژوهش‌های مختلفی انتشار گردوغبار را با استفاده از شبکه‌های عصبی بررسی کردند:

در پژوهش کادیناس و ریورا (Cadenas & Rivera, 2010) ترکیب مدل‌های شبکه عصبی[1] و آریما جهت پیش‌نگری سرعت باد در مکزیک نتایج بهتری نسبت به بررسی جداگانه هرکدام از مدل‌ها نشان داد. یافته‌های نژادکورکی و همکاران (Nejadkoorki & Baroutian, 2012) برای پیش‌نگری میزان PM_{10} در ۲۴ ساعت آینده تهران قابلیت ۸۳ درصدی شبکه عصبی مصنوعی را در پیش‌نگری نشان داد. شبکه عصبی مصنوعی با سه لایه و چهل نورون در لایه پنهان نتایج بهتری نسبت به دیگر مدل‌ها در یافته‌های آکینی (Akinci, 2011) برای پیش‌نگری سرعت باد در مناطقی از ترکیه ارائه داد. ژیاو و همکاران (Xiao, Wong, Lee, Campbell & Shea, 2015) برای پیش‌نگری گردوغبار از تصاویر ماهواره‌ای، شبکه عصبی مصنوعی و برای تجزیه‌وتحلیل مسیر حرکت و انتقال از مدل HYSPLIT[2] استفاده کردند. نتایج قابلیت خوب شبکه عصبی مصنوعی را در پیش‌نگری نمایش داد. شیبا و همکاران (Shaiba, Alaashoub & Alzahrani, 2018) به پیش‌نگری طوفان‌های گردوغبار در ۲۴ سال آینده با روش شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج نشان داد درخت تصمیم[3] عملکرد بهتری نسبت به روش رگرسیون لجستیک دارد. برای شهر سئول جنوبی پیش‌نگری میزان PM_{10} با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در پژوهش کیم (Kim, 2019) حاکی از عملکرد بالای مدل بود.

مقایسه عملکرد مدل‌های توابع پایه شعاعی[4] و سیستم استنباط عصبی-فازی تطبیقی[5] جهت پیش‌نگری طوفان‌های گردوغبار استان سیستان و بلوچستان طی دوره آماری (۱۹۹۰-۲۰۱۴) در پژوهش پورغلام آمیجی و همکاران (Pourgholam Amiji, Ansari Ghojghar, Bazrafshan, Liaghat & Araghinejad, 2020). عملکرد بهتر مدل سیستم استنباط عصبی-فازی تطبیقی را در

1- Artificial Neural Networks (ANN)
2- Hybrid Single Particle Lagrangian Trajectory
3- Classification And Regression Tree (CART)
4- Radial Basis Function (RBF)
5- Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)

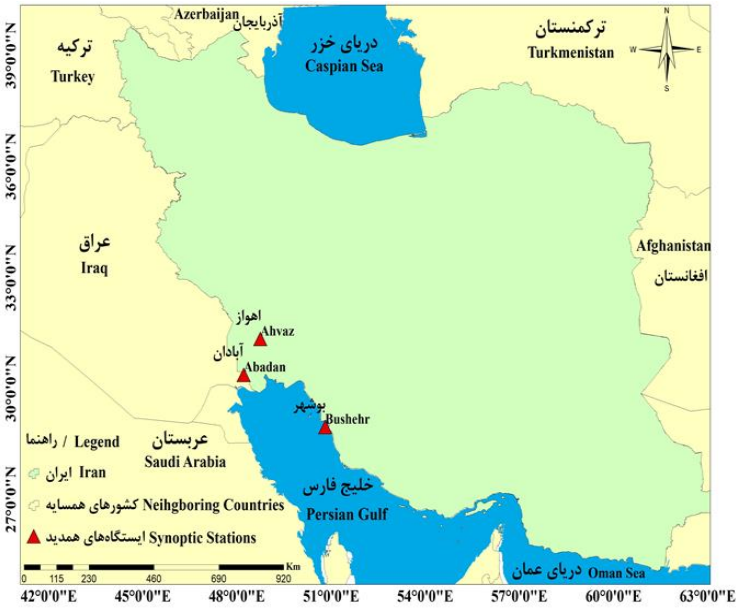
پیش‌نگری نشان داد که با نتایج یافته‌های صفریان زنگیر و همکاران (Safarian zengir, Zenali, Jafari hasi Kennedy & Jafarzadeh, 2018) در استان اردبیل و پژوهش میرزاده و همکاران (Mirzadeh, Nejadkoorki, Moosavi & Mirhoseini, 2021) در یزد هم‌راستا و با مطالعات سبحانی و صفریان زنگیر (Sobhani & Safarian zengir, 2019) در جنوب غرب ایران ناهمساز است. مدل سیستم استنباط عصبی-فازی تطبیقی در پژوهش انصاری قوجقار و همکاران (Ansari Ghojghar et al., 2020) جهت پیش‌نگری طوفان‌های گردوغبار نواحی بحرانی کشور در بین مدل‌های شبکه عصبی پرسپترون چندلایه[1]، توابع پایه شعاعی و شبکه عصبی رگرسیون تعمیم‌یافته[2] بهترین نتایج را نمایش داد که با نتایج پژوهش ابراهیمی خوسفی و همکاران (Ebrahimi-Khusfi, Taghizadeh-Mehrjardi & Nafarzadegan, 2021) در مناطق نیمه‌خشک ایران همسو است. پیش‌نگری انتشار گردوغبار در کاشان با مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه در پژوهش پورمعافی اصفهانی (Pourmaafi Esfahani et al., 2023) هم قابلیت بالایی را نشان داد. این مدل با ساختار ۱-۸-۱۰ پیش‌نگری غلظت گردوغبار را با بیشترین دقت برآورد کرد (Arjomandi, Kheiralipour & Amarloei, 2024). پورغلام آمیجی و همکاران (Pourgholam-Amiji, Ansari Ghojghar & Ahmadaali, 2021) به پیش‌نگری گردوغبار در استان خوزستان با روش‌های شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، سیستم استنباط عصبی-فازی تطبیقی، توابع پایه شعاعی و شبکه عصبی رگرسیون تعمیم‌یافته پرداختند. نتایج نشان داد مدل توابع پایه شعاعی بهترین مدل برای پیش‌نگری گردوغبار در این استان است که پژوهش محمودی و همکاران (Mahmoudi, Amiri Doumari, Safarianzengir, Maleki, Kianinejad & Kianian, 2020) در نیمه غربی ایران، مرزهای شرقی ترکیه و عراق از یافته‌های آنان پشتیبانی می‌کند. انصاری قوجقار و همکاران (Ansari Ghojghar, Araghinejad, Bazrafshan, Zahraie & Parsi, 2021) کارایی مدل هیبریدی GRU-LSTM[3] را در پیش‌نگری طوفان‌های گردوغبار ۷ ایستگاه همدید استان خوزستان طی دوره آماری (۱۹۹۰-۲۰۱۹) با مدل‌های توابع پایه شعاعی و ماشین بردار پشتیبان[4] مقایسه کردند و مدل هیبریدی بهترین عملکرد را نشان داد. مطابق با یافته‌های موریانی زاده و همکاران (Mourianizadeh, Khoorani & Sharif, 2024) در استان هرمزگان بررسی طوفان گردوخاک با شبکه عصبی مصنوعی و جنگل تصادفی[5] قابلیت بالای مدل جنگل تصادفی را بر مبنای معیارهای ارزیابی مربع مجذور میانگین خطا[6] و R^2 نمایش داد.

پیش‌نگری فراوانی گردوغبار با روش‌های دیگر چون آزمون موران در پژوهش حسینی و همکاران (Hosseini, Alijani & Waghei, 2020) برای استان خراسان رضوی نشان داد ایستگاه سبزوار در سال ۲۰۱۹ با ۵۶ روز بیشترین فراوانی را خواهد داشت. تحقیقات گسترده‌ای که انجام شده نشان می‌دهد یک روش پیش‌نگری برتر برای همه موارد و در حالت جامع در این حیطه وجود ندارد (Ahmed, Atiya, Gayar & El-Shishiny, 2010). روش‌های بسیاری برای مدل‌سازی و پیش‌نگری سری‌های زمانی توسعه یافته‌اند و انتخاب یک روش مناسب بسیار اهمیت دارد؛ بنابراین، برای به‌کارگیری یک مدل پیش‌نگری با دقت قابل قبول، باید چند روش پیش‌نگری مقایسه شود و توانایی هر یک در پیش‌نگری مشاهدات نمونه‌های آینده ارزیابی شود. به دلیل وجود الگوهای فصلی در داده‌های ایستگاه‌های تحت مطالعه، مدل ساریما[7] پرکاربرد و دارای دقت بسیار در مطالعات مشابه که توانایی پیش‌نگری الگوهای فصلی را نیز دارد، به‌عنوان مدل پیش‌نگری سری زمانی در این مطالعه در نظر گرفته شد و نتایج آن با روش شبکه عصبی مصنوعی (پرسپترون) مورد مقایسه قرار گرفت (Aboagye-Sarfo et al., 2015). همچنین در گام بعد جهت فراهم آوردن اطلاعات دقیق از زمان، مکان، شدت و مسیر حرکت این طوفان‌ها، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر میزان غلظت گردوغبار و مسیریابی گردوغبار ورودی به آن مورد بررسی قرار گرفت.

1- Multilayer perceptron (MLP)
2- General Regression Neural Network (GRNN)
3- Recurrent Unit- Lang Short Term Memory
4- Support Vector Machine (SVM)
5- Random Forest (RF)
6- Root Mean Square Error (RMSE)
7- Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average Model (SARIMA)

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش شامل ایستگاه‌های هواشناسی همدید با دوره آماری بلندمدت در غرب و نوار سواحل جنوبی ایران است که ایستگاه‌های آبادان، اهواز و بوشهر را شامل می‌شود. این ایستگاه‌ها فاصله کافی از یکدیگر دارند و به هم نزدیک نیستند و در منطقه کوهستانی مصون از توده‌های گردوغبار قرار نگرفته‌اند. آبادان ازنظر پهنه‌بندی اقلیمی جزو نواحی کم بارش با ۱۶۷ میلی‌متر بارش سالانه و رطوبت نسبی بالا (۴۵ درصد) بوده و دمای سردترین و گرم‌ترین روزهای سال آن برابر با ۱۳ و ۳۴ درجه سانتی‌گراد است. اهواز جزو پهنه گرم و خشک می‌باشد. میانگین عناصر اقلیمی نظیر دما و رطوبت نسبی آن به ترتیب ۲۶ درجه سانتی‌گراد و ۴۴ درصد و میانگین بارش سالانه آن ۲۴۵ میلی‌متر است (Movahedi, Heydari Naserabad, Hashemi Ana & Ranjbar, 2012). آب‌وهوای بوشهر در نوار ساحلی گرم و مرطوب و در قسمت‌های داخلی گرم و خشک صحرایی است. بارش متوسط و دمای سالانه آن به ترتیب ۲۱۷ میلی‌متر و ۲۴ درجه سانتی‌گراد است. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ و مشخصات ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- جایگاه جغرافیایی و پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه

Fig.1. Geographical location and distribution of the studied stations

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های همدید منتخب

Table 1- Specifications of selected synoptic stations

ایستگاه Station	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	ارتفاع از سطح دریا (متر) Altitude(m)	تعداد روزهای گردوغبار (۲۰۲۳-۱۹۸۷) Number of Dusty Dayes (1987-2023)
آبادان Abadan	48°21"	30° 37"	6.6	478
اهواز Ahvaz	48° 74"	31° 34"	22.5	390
بوشهر Busheh	50° 81"	28° 96"	9	230

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از داده‌های ساعتی گردوغبار شامل قدرت دید افقی کمتر از ۱ کیلومتر (Mohammadpour Penchah, Memarian & Mirrokni, 2015) و کدهای هوای حاضر بیان‌کننده گردوغبار (۶ تا ۹ و ۳۰ تا ۳۵) (Fattahi Masrour & Rezazadeh, 2022)، همچنین داده‌های میانگین دما، میانگین رطوبت نسبی به درصد و میانگین سرعت و جهت باد به‌صورت سری زمانی فصلی برای دوره آماری (۱۹۸۷-۲۰۲۳) استفاده شده است.

لازم به ذکر است در این پژوهش همگنی داده‌ها با استفاده از آزمون ران تست بررسی شد. درنهایت ارزیابی و تصادفی بودن داده‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ پذیرفته شد. به‌منظور پیش‌نگری فراوانی طوفان‌های گردوغبار برای آینده (۲۰۲۴-۲۰۴۰) از مدل کاربردی شبکه عصبی پرسپترون چندلایه استفاده شد و متغیر چهار فصل برای پیش‌نگری فصول آینده مورد استفاده قرار گرفت. نتایج پیش‌نگری حاصل از این مدل با مدل ساریما مورد مقایسه قرار گرفت. برای ارزیابی کارایی شبکه عصبی و مدل ساریما در پیش‌نگری، از معیارهایی مانند میانگین مجذور خطا[1]، مربع مجذور میانگین خطا و ضریب همبستگی (R) استفاده شد. این معیارها با استفاده از رابطه‌های (۱، ۲ و ۳) تعریف می‌شوند.

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(F_i - O_i)^2 \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(F_i - O_i)^2}{n}} \quad (۲)$$

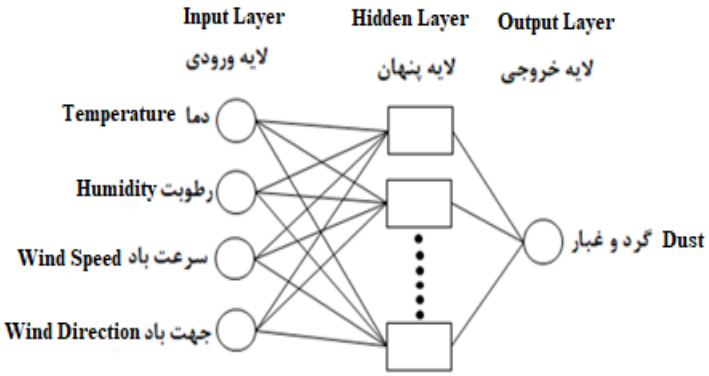
$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(F_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^{n}(F_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(F_i - \bar{O})^2} \quad (۳)$$

در این رابطه‌ها، F_i مقادیر پیش‌نگری شده و O_i مقادیر مشاهداتی، O میانگین مقادیر مشاهداتی و n تعداد مشاهدات است (Zhu, Lu & Zhou, 2007; Araghinejad, 2013).

شبکه عصبی پرسپترون چندلایه

در مدل‌سازی به‌وسیله شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، نورون‌ها در لایه‌های گوناگونی قرار می‌گیرند. لایه اول را لایه ورودی می‌نامند که داده‌های ورودی را أخذ کرده و بر مبنای توانایی رابطه‌اش با نورون لایه دیگر، سیگنال ورودی را به لایه بعدی انتقال می‌دهد. توانایی ارتباط هر نورون با نورون دیگر را وزن نورون می‌نامند که مقدار نورون‌ها در هر لایه به‌اندازه نورون‌های لایه ورودی، شبکه‌های عصبی تشکیل یافته از لایه‌های وسطی و لایه خارجی می‌باشد. لازم به ذکر است که مقدار لایه‌های وسطی و نیز مقدار نورون‌های هر لایه می‌تواند به هر تعدادی باشد (Haykin, 2004). شکل ۲ شمایی از ساختار شبکه پرسپترون چندلایه مورداستفاده را نشان می‌دهد.

1- Mean Squared Error (MSE)



شکل ۲- ساختار شبکه عصبی پرسپترون چندلایه
Fig.2. Structure of Multi-Layer Perceptron

مدل ساریما

مدل ساریما اولین بار جهت استفاده در سری زمانی فصلی به‌کاربرده شده است (Box, Jenkins & Reinsel, 1994). منظور از سری زمانی فصلی، سری‌هایی است که تااندازه‌ای واکنش منظمی در فاصله‌های زمانی با طول ایستا از خود بروز می‌دهند (Hyndman & Khandakar, 2008). اگر در یک سری زمانی عمل توالی در اندازه‌های زمانی معین (S) تعیین شود، این سری زمانی دربردارنده توالی فصلی است و برای مدل‌سازی آن مدل ساریما مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل P، d و q به ترتیب نشان دهنده اتورگرسیونی، تفاضل و میانگین متحرک غیرفصلی هستند. درحالی‌که P، D و Q نمایانگر پارامترهای فصلی هستند که به ترتیب مرتبه‌های اتورگرسیون، تفاضل و میانگین متحرک فصلی را مشخص می‌کنند (Jahanbakhshasl, Khorshiddoust, Abbsighasrik & Abbasighasrik, 2024).

در گام بعد بر مبنای گزارش انتشاریافته از سازمان هواشناسی در تاریخ‌های ۲۹ جولای ۲۰۰۹، ۸ ژوئن ۲۰۱۰، ۳ ژوئن ۲۰۱۱ و ۱۱ مارس ۲۰۱۲ هر سه ایستگاه به‌طور مشترک درگیر طوفان گردوغبار بوده‌اند؛ بنابراین در ادامه پژوهش با استفاده از مدل لاگرانژی HYSPLIT مسیر ذرات گردوغبار به دلیل متفاوت بودن این مسیرها در ارتفاعات گوناگون در سه سطح ۲۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متری از سطح زمین در حدفاصل زمانی ۶ ساعت قبل از ورود گردوغبار با استفاده از روش پسگرد[1] ردیابی شد. سپس خروجی آن با مدل‌های سامانه پیش‌نگری و تجزیه‌وتحلیل هواویزهای نیروی دریایی[2] و سامانه میان‌مقیاس اقیانوسی– اتمسفری[3] مورد مقایسه قرار گرفت.

مدل HYSPLIT

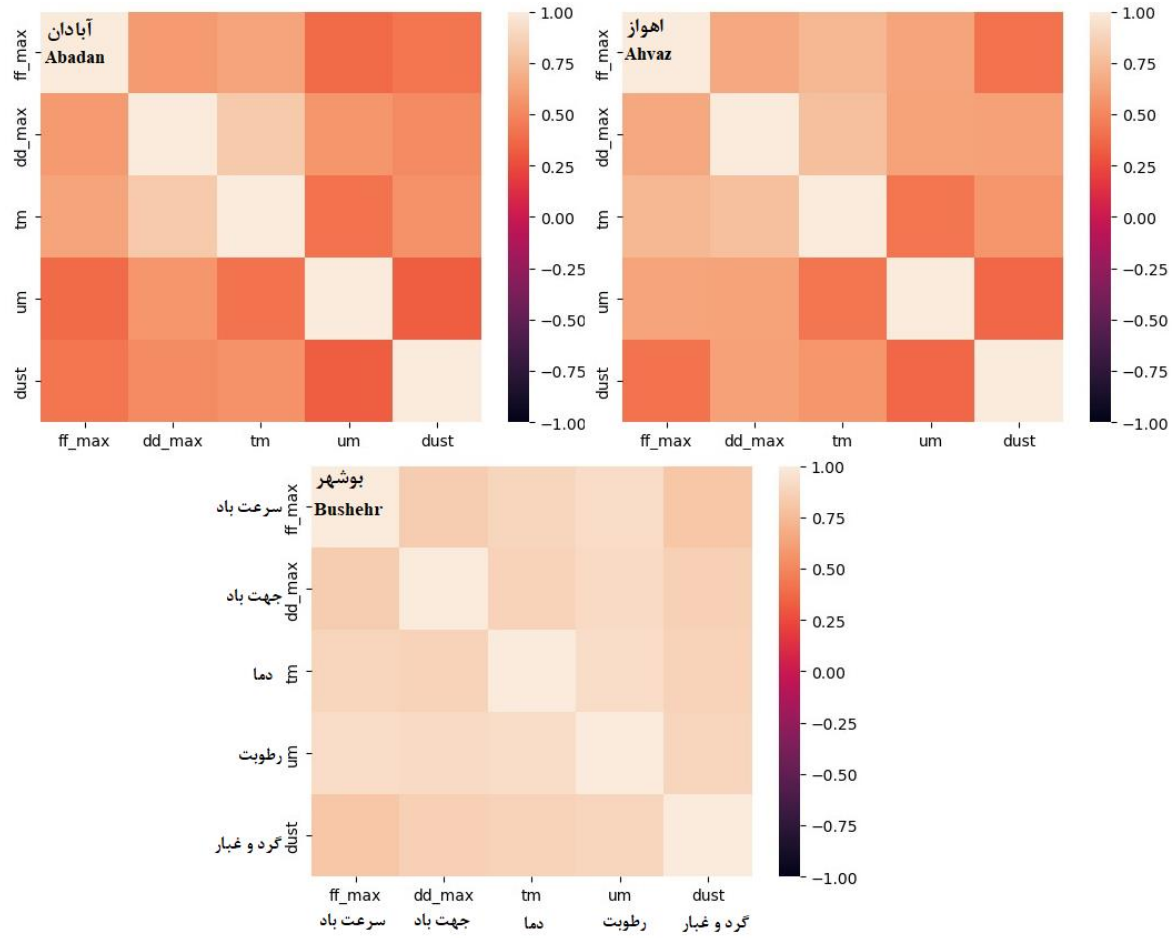
مدل HYSPLIT، مدلی هیبریدی برای ارزیابی خط سیر حرکت گردوغبار است. روش برآورد آن تلفیقی از دیدگاه‌های اویلری (مشخص شدن جمع تراکم ذرات در هر کانال در طول مسیر گذر) و لاگرانژی (تراکم ذرات برای هر کانال با استفاده از توزیع و جابجایی ذرات) است (Draxler & Hes, 1998; Draxler, Stunder, Rolph, Stein & Taylor, 2009). در این مدل محاسبه مسیر و غلظت آلاینده با استفاده از حداقل پارامترهای هواشناسی انجام می‌گیرد. زیر بخش تعیین غلظت مدل نیاز به داده‌های کامل هواشناسی ازجمله سرعت باد (در سه جهت مداری، نصف‌النهاری و قائم) ارتفاع لایه مرزی، درجه حرارت، فشار سطحی، مقدار اختلاط افقی- عمودی، شار گرمای سطحی- پنهان، شار تلاطمی، میزان بارش و رطوبت دارد. این مدل توسط لابراتوار هوایی سازمان ملی طراحی و گسترش یافته است (Draxler & Rolph, 2003).

1- Backward
2- NRL Aerosol Analysis and Prediction System (NAAPS)
3- Coupled Ocean-Atmospheres Meso scale Prediction System (COAMPS)

مرکز تحقیقاتی نیروی دریایی، یک سیستم عملیاتی برای پیش‌نگری گردوغبار، سولفات و هواویزهای دود را با استفاده از ابزارهای ماهواره‌ای گوناگون فراهم کرده است. این مدل به نام سامانه پیش‌نگری و تجزیه‌وتحلیل هواویزهای نیروی دریایی نامیده می‌شود. علاوه بر این نیروی دریایی، از مدل منطقه‌ای دیگری با نام سامانه میان‌مقیاس اقیانوسی– اتمسفری نیز استفاده می‌کند. این مدل‌ها از وب سایت https://www.nrlmry.navy.mil/aerosol/index_frame.html قابل دریافت است.

نتایج و بحث

اولین قدم در پیش‌نگری، شناسایی ویژگی‌های مهم نظیر همبستگی بین داده‌ها است. وجود همبستگی بین داده‌های سری زمانی، امکان اجرای مدل‌سازی و پیش‌نگری مقادیر بعدی را فراهم می‌نماید. در این پژوهش برای بررسی همبستگی بین فراوانی گردوغبار با داده‌های میانگین رطوبت نسبی، دما، سرعت و جهت باد از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. باتوجه به شکل ۳، همان‌طور که مشاهده می‌شود اثر این متغیرها بر فراوانی گردوغبار در همه ایستگاه‌ها با ضرایب همبستگی مستقیم همراه است. بین رخداد گردوغبار در ایستگاه آبادان قوی‌ترین رابطه با میانگین دما و ضعیف‌ترین آن با رطوبت نسبی برقرار بوده است که به ترتیب برابر با ۰/۵۱۷ و ۰/۳۲۳ می‌باشد. وجود بیشترین مقدار رابطه مثبت میان دما و گردوغبار می‌تواند بیانگر آن باشد که طوفان‌های گردوغبار با فعالیت هوای گرم همراه هستند و بنابراین گرمایش یا افزایش دما می‌تواند منجر به ایجاد شرایط مساعد تولید گردوغبار شود همچنین نشان می‌دهد فصل همراه با کمترین تعداد روزهای طوفانی با فصل همراه با بیشترین میزان رطوبت نسبی در آبادان تطابق ندارد. از طرفی درجه حرارت در آن بیشترین میزان خود را تجربه می‌کند. در واقع این نتیجه می‌تواند فراملی بودن قسمت عمده طوفان‌های گردوغبار را تأیید کند. همساز با پژوهش نبوی و همکاران (Nabavi, Moradi & Shrifikia, 2019) در ایستگاه اهواز جهت باد نسبت به سایر متغیرها بیشترین میزان همبستگی (۰/۶۲۵) را با گردوغبار دارد. با توجه به بالا بودن مقدار ضریب همبستگی بین این متغیر و گردوغبار در اهواز می‌توان اذعان کرد، روند گردوغبار در این ایستگاه توسط متغیر متوسط جهت باد کنترل می‌شود و به‌صورت مستقیم به دلیل اثرگذاری در نوع و تراکم پوشش گیاهی و میزان رطوبت خاک در گردوغبار تأثیرگذار است؛ اما نمی‌توان از تأثیر سایر عوامل جانبی مانند عوامل انسانی چشم‌پوشی کرد. در ایستگاه بوشهر بیشترین نسبت بین گردوغبار با رطوبت نسبی وجود دارد که مقدار آن برابر با ۰/۸۸۸ بوده و با نتایج پژوهش راهی و همکاران (Rahi, Bahraini, KhosroShahi & Biabani, 2022) در بوشهر ناهمساز و با پژوهش مهرابی و همکاران (Mehrabi, Soltani & Jafari, 2015) در خوزستان همساز است. کمترین میزان ضرایب همبستگی در اهواز شامل رطوبت نسبی و در بوشهر شامل سرعت باد به ترتیب برابر با ۰/۳۶۲ و ۰/۸۰۹ می‌باشد؛ دلیل عدم کاهش رطوبت نسبی در سال‌های همراه با حداکثر فراوانی گردوغبار اهواز را می‌توان به فراملی بودن منشأ عمده بیشتر طوفان‌ها نسبت داد. البته حرکت گردوغبار ناشی از جریان‌های هوایی از صحرای عربستان به سمت بوشهر و نبود پوشش گیاهی مناسب و فرسایش خاک در این مناطق مزید بر علت شده و در تشدید وضعیت گردوغبار کمک کرده است. علاوه بر این، فاکتورهای دیگری از قبیل خصوصیات خاک، نوع پوشش گیاهی، تابش خورشیدی و غیره می‌تواند بر ارتباط متقابل میان وقوع گردوغبار و پارامترهای اقلیمی تأثیرگذار باشد؛ بنابراین وجود همبستگی قابل‌قبول بین متغیرها امکان اجرای مدل‌سازی و پیش‌نگری مقادیر آینده (فصول آتی) را برای سه ایستگاه مورد مطالعه ممکن می‌سازد.



شکل ۳ – ضریب همبستگی بین متغیرها با فراوانی گردوغبار

Fig.3. Correlation coefficient between variables with dust frequency

جدول ۲ مقادیر معیارهای ارزیابی، جهت پیش‌نگری فراوانی روزهای همراه با طوفان گردوغبار را نشان می‌دهد. در واقع با این سه پارامتر مدل بهینه انتخاب شد. مدل بهینه مدلی است که دارای کمترین مقدار میانگین مربعات خطا و میانگین مجذور خطای داده‌های اعتبارسنجی بوده و مقادیر ضریب همبستگی داده‌ها در آن بیشتر باشد. بر مبنای این توصیف مشاهده می‌شود که مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه در همه ایستگاه‌ها از خطای کمتر و همبستگی بیشتری نسبت به مدل ساریما برخوردار است؛ بنابراین می‌تواند به‌عنوان مدل بهینه در پیش‌نگری استفاده شود. این یافته همساز با نتایج پژوهش انصاری قوجقار و همکاران (Ansari Ghojghar, Bazrafshan & Araghinejad, 2022) در خوزستان است که نشان دادند فرامدل هیبریدی AF-SVM نسبت به مدل‌های آریما و ساریما کاربرد بهتری در پژوهش دارد و نتایج پژوهش احمدپور و همکاران (Ahmadpour, Mirhashemi & Panahi, 2021) هم نشان داد شبکه عصبی مصنوعی عملکرد بهتری نسبت به مدل ساریما دارد.

جدول ۲- مقایسه دقت مدل‌ها جهت پیش‌نگری گردوغبار

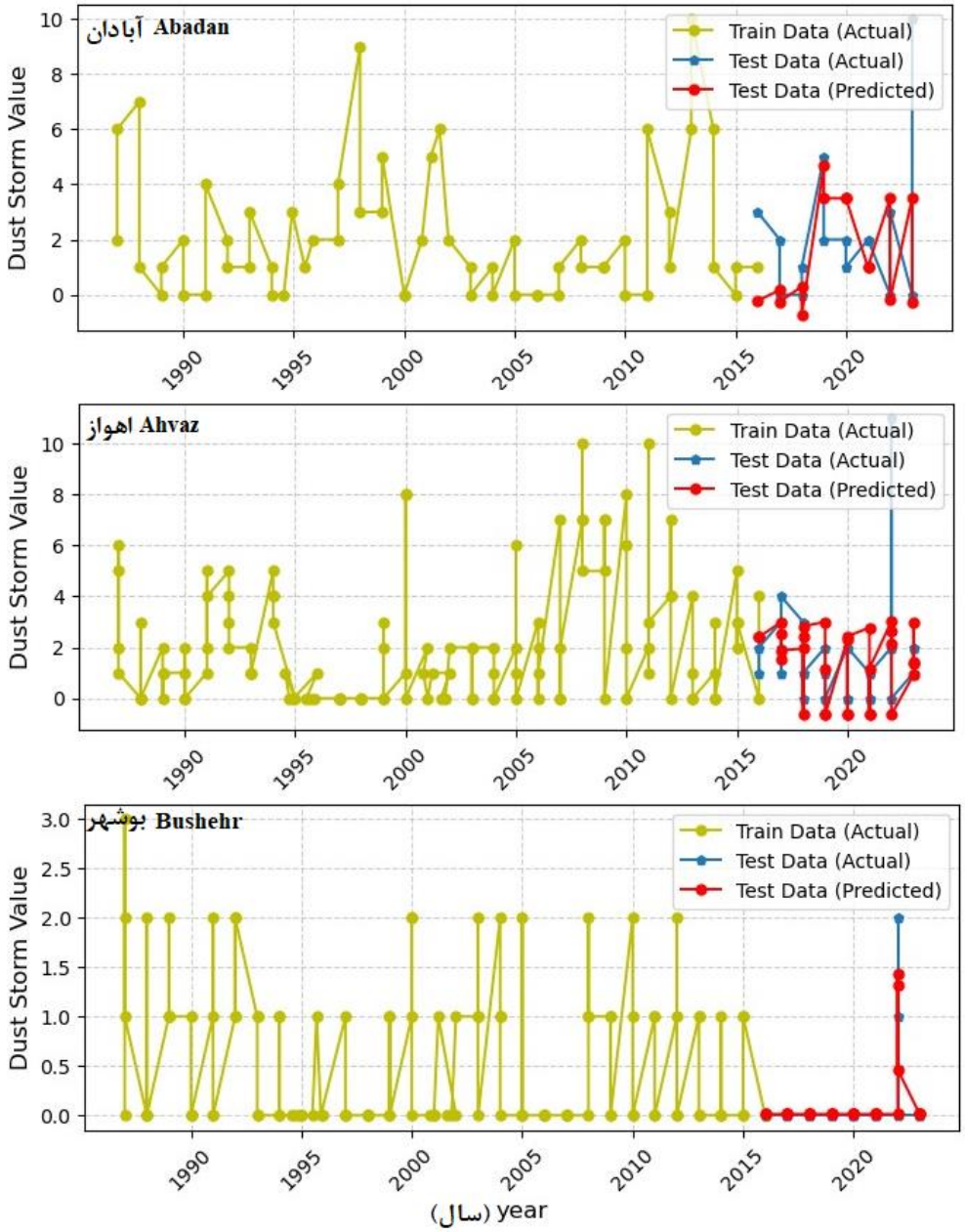
Table 2- Comparing the accuracy of models for dust forecasting

مدل ساریما SARIMA Model			مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه Multi-Layer Perceptron			ایستگاه Station
RMSE	MSE	R	MSE	RMSE	R	
۴/۳۲	۸/۲۹	۰/۳۵	۲/۶۳	۶/۹۶	۰/۴۳	آبادان Abadan
۴/۶۸	۲/۳۵	۰/۴۶	۳/۲۰	۱/۷۹	۰/۵۰	اهواز Ahvaz
۱/۱۵	۱/۲۸	۰/۶۵	۰/۰۲	۰/۱۶	۰/۹۰	بوشهر Bushehr

نمودار روزهای توأم با گردوغبار ایستگاه‌های تحت مطالعه برحسب زمان و مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌نگری شده با استفاده از مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه در مرحله آزمایش (شکل ۴) نشان‌دهنده میزان تطبیق و سازگاری مربوط به مقادیر واقعی (مشاهداتی) متغیر گردوغبار ایستگاه‌ها و مقادیر پیش‌نگری شده متغیر هدف (روزهای توأم با گردوغبار) توسط مدل است که برحسب زمان مرتب شده است. در این مدل، ۸۰ درصد از داده‌ها به‌عنوان مجموعه داده‌های آموزش و ۲۰ درصد داده‌ها به‌عنوان مجموعه داده‌های آزمایش در نظر گرفته‌شده است. به‌خوبی از این نمودارها مشخص است که مدل در تخمین مقادیر هدف در مرحله آزمایش با دقت قابل قبولی عمل کرده است. به‌طوری‌که این مقدار نزدیک به مقادیر واقعی آن‌ها تخمین زده شده است و با یکدیگر تطابق خوبی دارند. البته هرچقدر طوفان گردوغبار برای دوره آماری بلندتر در نظر گرفته شود توانایی مدل بیشتر و داده‌های پیش‌نگری شده نیز از عملکرد بهتری برخوردار خواهند بود.

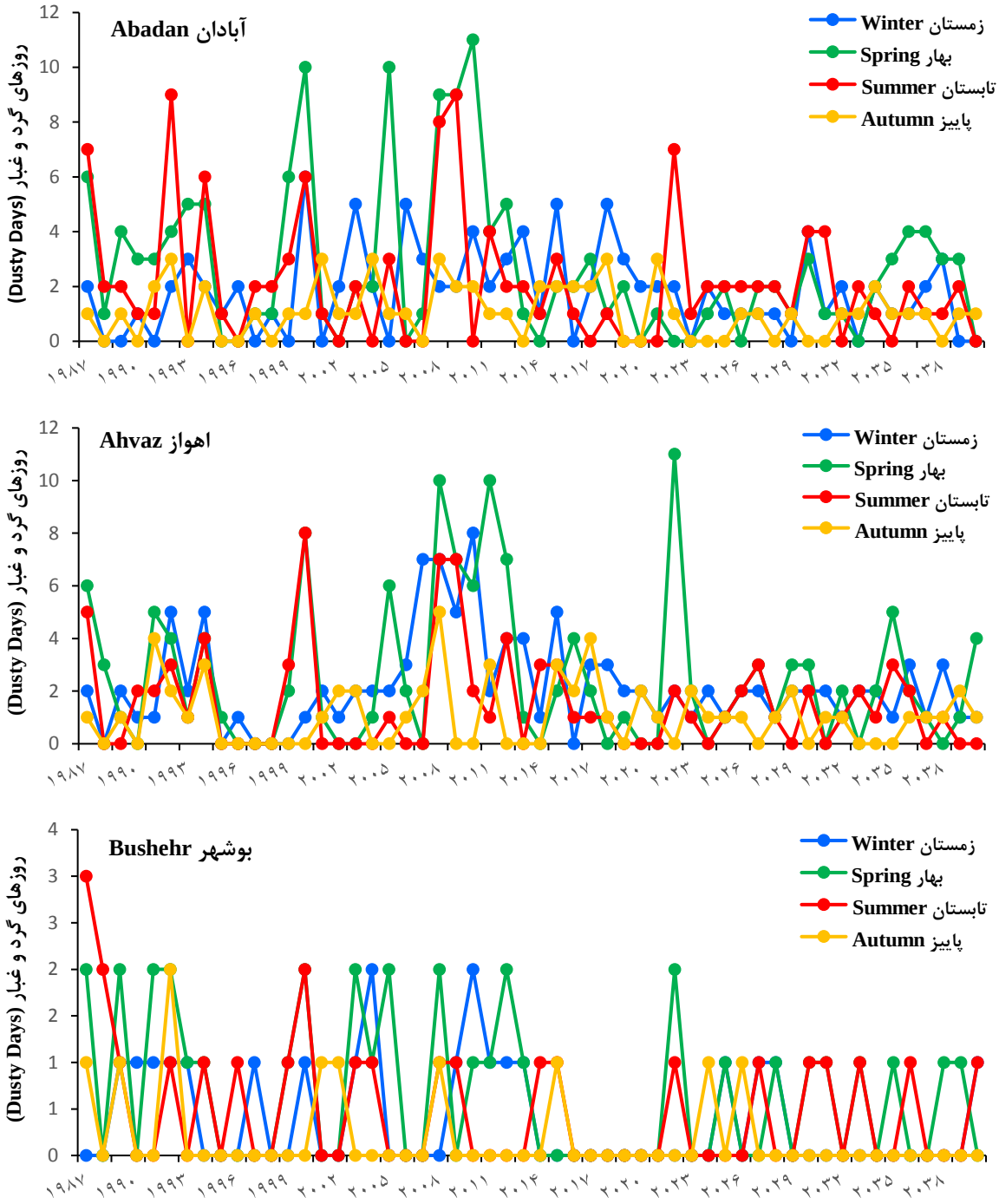
شکل ۵ تغییرات گردوغبار در مقیاس فصلی برای ایستگاه‌ها را طی دوره مشاهداتی (۱۹۸۷-۲۰۲۳) و دوره آینده (۲۰۲۴-۲۰۴۰) نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، فراوانی روزهای همراه با گردوغبار در ایستگاه آبادان هم در دوره مشاهداتی و هم در دوره آینده در فصل بهار رکورددار بوده است. بعد از آن فصل تابستان در رتبه بعدی ازنظر بیشترین تعداد گردوغبار قرار دارد. در واقع این فصول بهار و تابستان با گرمایش سطحی، جریانات جوی فعال، افزایش ساعات تابش روزانه خورشید، وقوع ناپایداری‌های محلی، خشکی آب‌وهوا، کاهش رطوبت موجود در خاک، افزایش فرسایش‌پذیری و حرکت خاک هم‌زمان هستند که سبب افزایش ذرات محلی و فراملی و همچنین افزایش سرعت باد می‌شود. ملاحظه می‌شود که طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۲ وقوع گردوغبار در همه فصول به‌صورت متوالی بوده است. سه دوره اوج طوفان‌های گردوغبار مربوط به سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۲، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱ در تمامی فصول قابل‌مشاهده است. در ایستگاه اهواز همانند آبادان فصل بهار رکورددار بیشترین تعداد گردوغبار در دوره مشاهداتی و آینده بوده است و برای سال‌های مشاهداتی دوره‌های اوج طوفان گردوغبار دربردارنده سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۶، ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ و سال ۲۰۲۳ بوده است. این تغییرات گویای دگرگونی اقلیم در منطقه است و با نگرش به این تغییرات دستاورد تغییر اقلیم، افزایش گردوغبار بوده است. علت حداکثر بودن تعداد روزهای گردوغباری در ایستگاه‌های آبادان و اهواز به موقعیت جغرافیایی آن‌ها، نزدیکی به کانون‌های ریزگرد در داخل و خارج کشور، ویژگی‌های فیزیکی و طبیعی منطقه، نحوه عبور و موجی بودن جریانات جوی مربوط می‌شود. این ایستگاه‌ها علاوه بر این‌که از طوفان‌های شمال غرب و غرب استان سهم دارند طوفان‌های شمال شرق و شمال عربستان هم آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در ایستگاه بوشهر هر چهار فصل ازنظر فراوانی گردوغبار دارای افت‌وخیز و نوسان بوده است و تابستان سال ۱۹۸۷ بیشترین فراوانی را دارا بوده است. از طرفی موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های اقلیم محلی این ایستگاه سبب شده تا از منشأ طوفان در عربستان فاصله داشته باشد و طوفان‌های این منطقه با نسبت کمتری به این ایستگاه برسد.

در نوار ساحلی بوشهر، کمبود پوشش گیاهی، وجود نمکزار و شوره‌زار، فرسایش خاک، هم‌چنین وزش نسیم خشکی به دریا و بالعکس در ساعت‌های مختلف شبانه‌روزی از علل تشدیدکننده پدیده گردوغبار است. طی دهه‌های آتی، سال‌های ۲۰۳۶ و ۲۰۳۷ در ایستگاه آبادان و سال ۲۰۳۵ در اهواز از بیشترین فراوانی گردوغبار برخوردار هستند و درمجموع هر سه ایستگاه همدید در فصل پاییز هم در دوره مشاهده شده و هم در دهه‌های آتی از فراوانی گردوغبار کمتری برخوردار بوده است.



شکل ۴ – نمودار گردوغبار ایستگاه‌های مورد مطالعه برحسب زمان و مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌نگری شده توسط شبکه عصبی پرسپترون چندلایه در مرحله آزمایش مدل

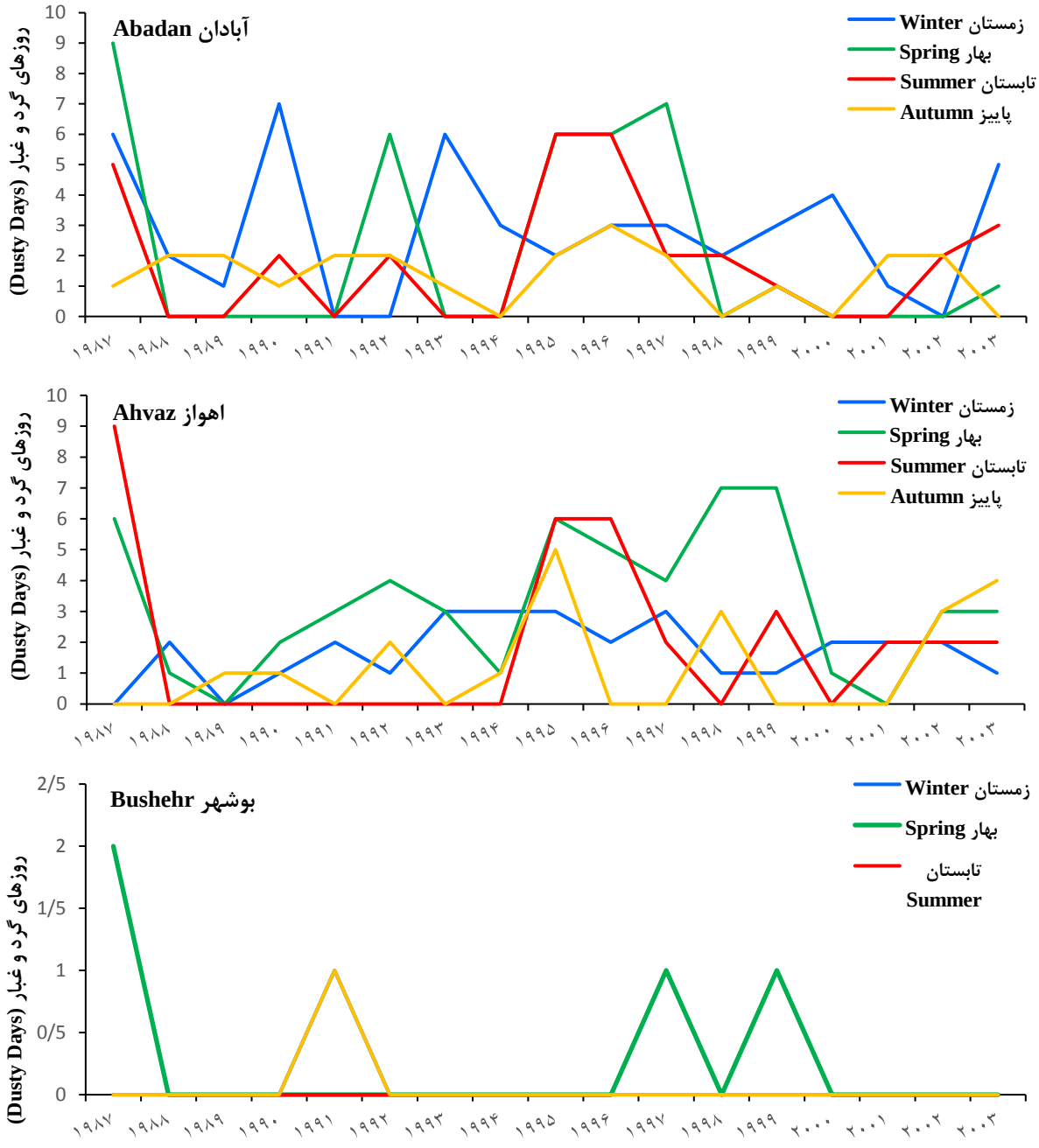
Fig.4. Dust diagram of the studied stations over time and comparison of actual and predicted values by the Multi-Layer Perceptron neural network model in the model testing phase



شکل ۵- نمودار سری زمانی فراوانی گردوغبار سالانه در سال‌های پیش‌نگری شده برای ایستگاه‌ها با مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه

Fig.5. Time series graph of annual dust abundance in forecasted years for stations with Multi-Layer Perceptron neural network model

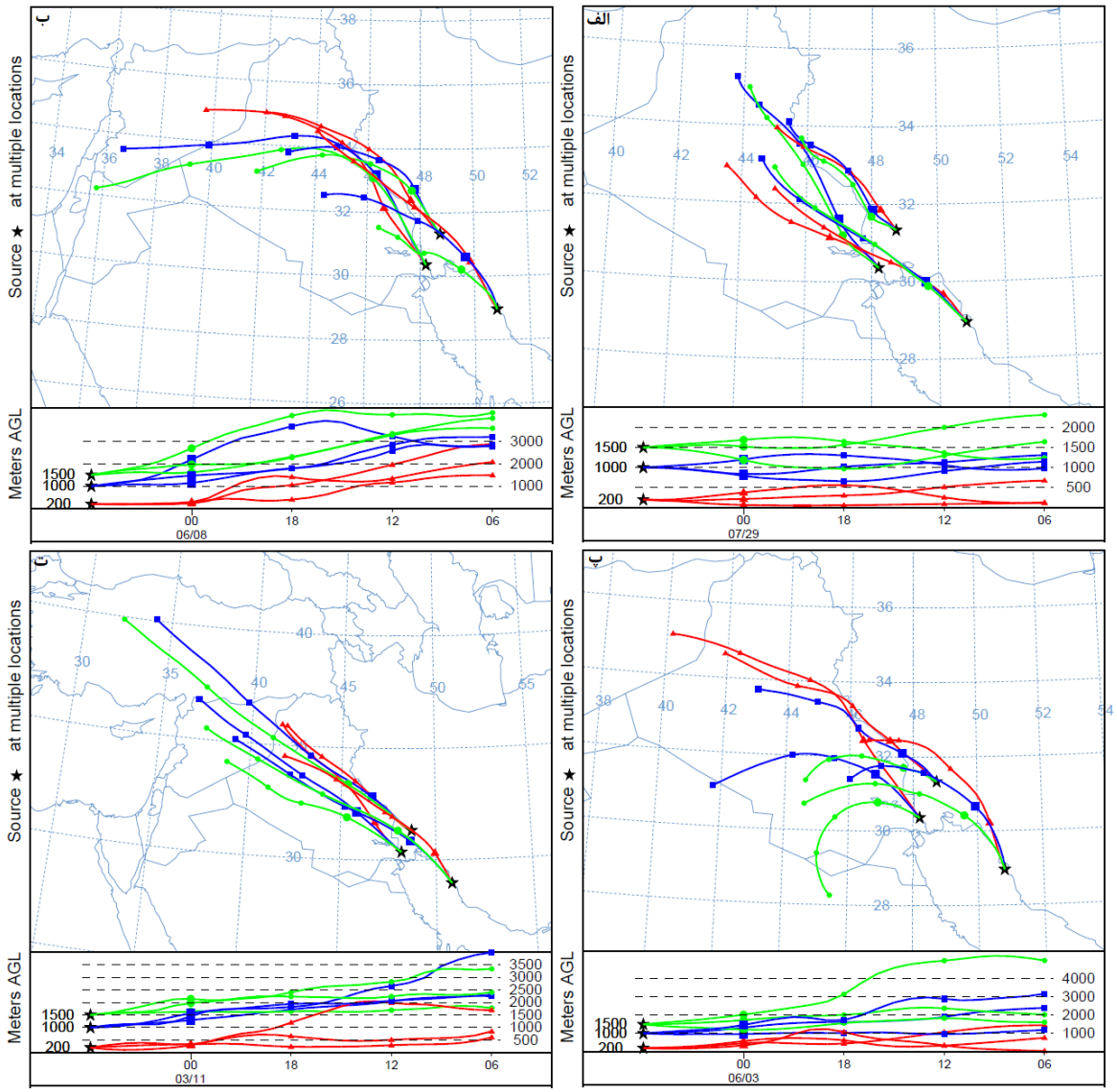
پیش‌نگری با مدل ساریما نشان می‌دهد که همانند مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، فصل بهار رکورددار فراوانی وقوع گردوغبار در هر سه ایستگاه بوده است. درحالی‌که فصل پاییز از فراوانی کمتری برخوردار بوده است (شکل ۶).



شکل ۶– همانند شکل ۵ ولی با مدل ساریما

Fig.6. Same as Figure 5 but with the SARIMA model

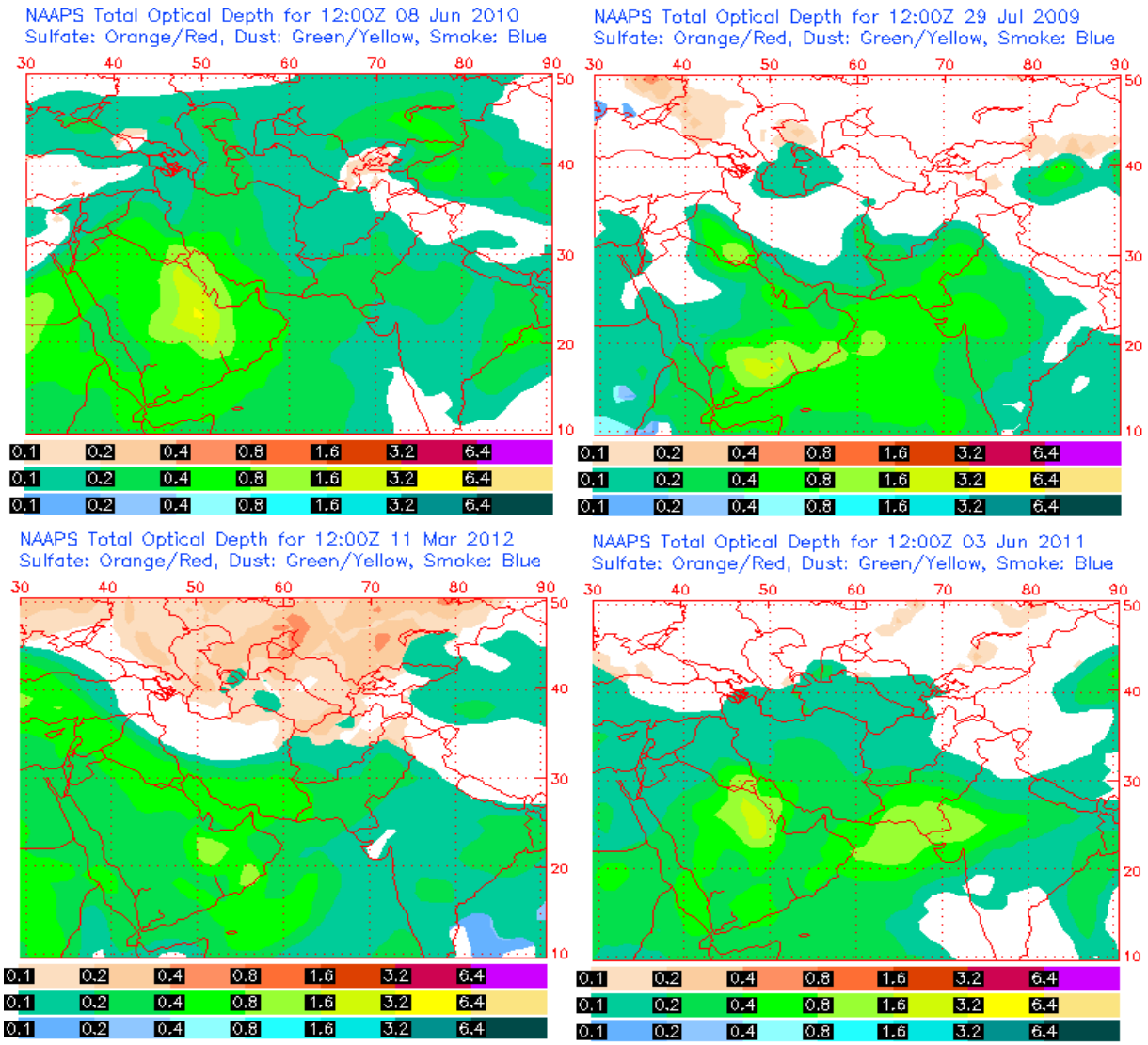
مسیریابی رخدادهای انتقالی که خط سیر آن‌ها در طول تاریخ‌های مشترک ۲۹ جولای ۲۰۰۹، ۸ ژوئن ۲۰۱۰، ۳ ژوئن ۲۰۱۱ و ۱۱ مارس ۲۰۱۲ از روی ایستگاه‌های منتخب عبور کرده در سه سطح ارتفاعی ۲۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متری از سطح زمین در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج اجرای مدل HYSPLIT نشان می‌دهد ساز و کار اصلی انتقال ذرات گردوغبار در محدوده‌ای در حدفاصل بین عراق و قسمت‌هایی از ترکیه، عربستان و سوریه به پهنه مورد پژوهش بوده است و ذرات گردوغبار در ارتفاعات مختلف مسیر مشابهی را پیموده‌اند و ذراتی که در ارتفاع ۲۰۰ متری از سطح زمین قرار دارند و موجب کاهش دید افقی می‌شوند، منشأ و گسیل آن‌ها کشور عراق بوده است.



شکل ۷– ردیابی پسگرد مسیر طوفان‌های گردوغبار با گام زمانی شش ساعته در ایستگاه‌های منتخب غرب و نیمه غرب ایران الف) روز ۲۹ جولای ۲۰۰۹، ب) ۸ ژوئن ۲۰۱۰، پ) ۳ ژوئن ۲۰۱۱ و ت) ۱۱ مارس ۲۰۱۲

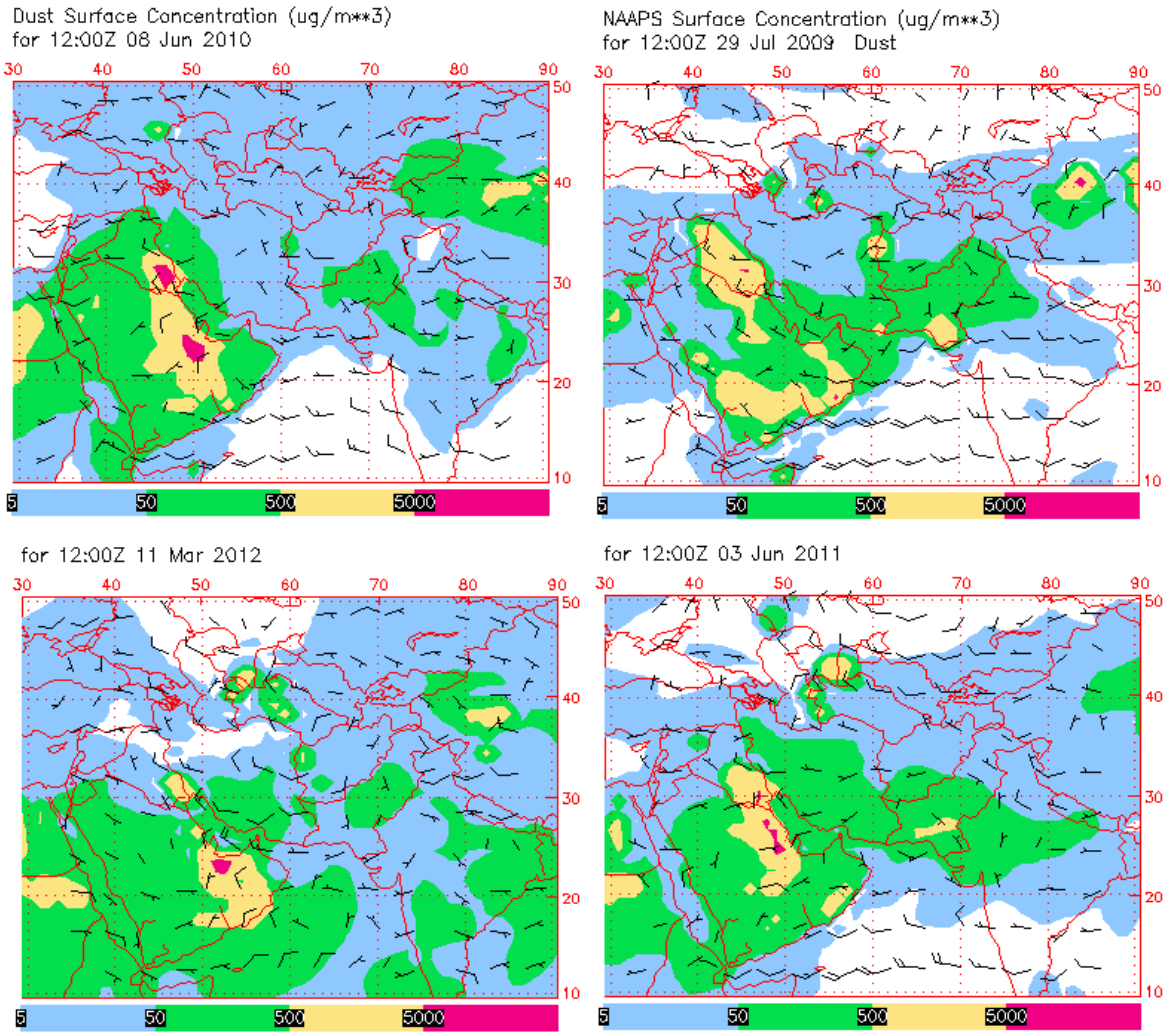
Fig.7. Tracking the backscatter of dust storms with a six-hour time step at selected stations in western and mid-western Iran on a) 2009/06/29, b) 2010/06/08, c) 2011/06/03, and d) 2012/03/11

شاخص عمق اپتیکی و غلظت گردوغبار سطحی در مدل NAAPS (اجرا شده به‌وسیله آزمایشگاه تحقیقاتی نیروی دریایی آمریکا) نشان می‌دهد که در تاریخ‌های مذکور عمق اپتیکی گردوغبار (رنگ سبز، ۰/۸) و غلظت گردوغبار سطحی در مناطق غربی ایران (عراق و قسمت‌هایی از عربستان) بالا بوده است. با حرکت توده‌هوای دارای گردوغبار به سمت شرق، به‌تبع آن میزان غلظت سطحی و عمق اپتیکی در محدوده جنوب غرب ایران و ایستگاه‌های موردپژوهش نیز بالا رفته است. مدل COAMPS نیز برای عمق اپتیکی گردوغبار در این تاریخ‌ها نشان می‌دهد قسمت‌های وسیعی از عراق و عربستان دارای عمق اپتیکی بسیار بالایی بوده که با حرکت دادن توده‌هوای خود به‌طرف ایران، مقادیر زیادی از عمق اپتیکی بالا را به محدوده تحت بررسی انتقال داده‌اند (شکل ۸ تا ۱۰).



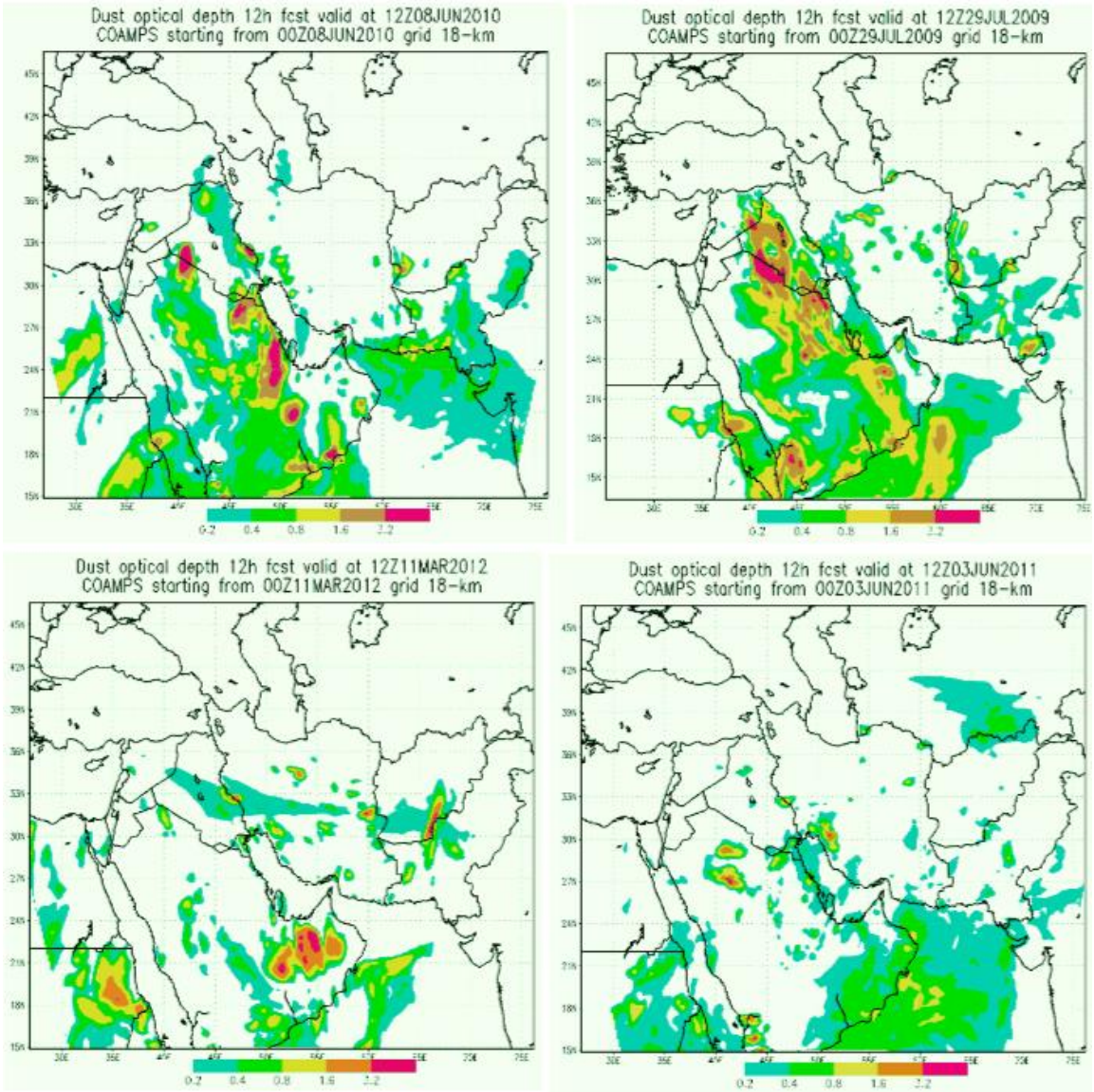
شکل ۸– نتایج مدل NAAPS برای عمق اپتیکی کل (سولفات، گردوغبار و دود) برای روزهای ۲۹ جولای ۲۰۰۹، ۸ ژوئن ۲۰۱۰، ۳ ژوئن ۲۰۱۱ و ۱۱ مارس ۲۰۱۲

Fig.8. NAAPS model results for total optical depth (sulfate, dust and smoke) for 2009/06/29, 2010/06/08, 2011/06/03 and 2012/03/11



شکل ۹- همانند شکل ۸ ولی برای غلظت گردوغبار سطحی

Fig.9. Same as Figure 8, but for surface dust concentration



شکل ۱۰- نتایج مدل COAMPS برای پیش‌نگری عمق اپتیکی گردوغبار سطحی برای روزهای ۲۹ جولای ۲۰۰۹، ۸ ژوئن ۲۰۱۰، ۳ ژوئن ۲۰۱۱ و ۱۱ مارس ۲۰۱۲ در بازه‌های زمانی یک‌روزه

Fig.10. COAMPS model results for predicting surface dust optical depth for 2009/06/29, 2010/06/08, 2011/06/03 and 2012/03/11 at one-day time intervals

نتیجه‌گیری

پیدایش بیابان، خشک شدن آبگیرها، دگرگونی اقلیمی، نبود مدیریت درست منابع آبی، هرج‌ومرج و بی‌نظمی‌های کشورهای همسایه و عدم رسیدگی به مسائل منطقه را می‌توان ازجمله موارد مهم ظهور طوفان‌های گردوغبار در غرب و جنوب غرب کشور به‌حساب آورد. در این پژوهش برای بررسی دقیق و پیش‌نگری فراوانی روزهای همراه با طوفان‌های گردوغبار در مقیاس زمانی فصلی، شبکه عصبی پرسپترون چندلایه که یک نوع هوش مصنوعی و ابزار توانمند در حیطه پیش‌نگری محسوب می‌شود را با مدل ساریما

مقایسه نمودیم. نتایج نشان داد که با توجه به داده‌های ورودی، شبکه عصبی پرسپترون چندلایه قابلیت پیش‌نگری دقیق تراکم گردوغبار در ایستگاه‌های مورد مطالعه را دارد. قابلیت این مدل برای پیش‌نگری گردوغبار کارخانه سیمان سبزوار در پژوهش کیخسروی و همکاران (Keykhosravi, Nejadkoorki & Amintoosi, 2019) و پیش‌نگری گردوغبار اهواز در پژوهش حسینی شاه پریان و همکاران (Hosseini Shah Parian, Firouzi & Hosseini Kahnouj, 2021) تأیید شد. از بین چهار متغیر مورد استفاده برای مدل‌سازی همسو با یافته‌های درگاهیان و همکاران (Dargahian, Yasrebi & Khosrowshahi, 2022) خسروشاهی و همکاران (Khosroshahi et al., 2024)، نگهبان و همکاران (Negahban, Ganjaeian, Ghisarian & Ebrahimi, 2024) و فرزانه‌پی و همکاران (Farzanehpey, Ranjbar-Fordoe, Khosravi & Mosavi, 2024) در ایستگاه آبادان پارامتر دما بیشترین تأثیر را در گردوغبار نشان داد. در اهواز جهت باد همساز با پژوهش‌های سلیقه و کاخکی کهنه (Saligheh & Kakhaki Mehneh, 2015) و در ایستگاه بوشهر رطوبت نسبی همساز با نتایج پژوهش‌های پورمعافی اصفهانی و همکاران (Pourmaafi Esfahani et al., 2023) و مهرابی و همکاران (Mehrabi et al., 2015) و ناهمساز با نتایج پژوهش راهی و همکاران (Rahi et al., 2022) در بوشهر بیشترین تأثیر و اهمیت را در مدل‌سازی انتشار گردوغبار نشان دادند. این یافته می‌تواند در شناخت اثرات نوسانات اقلیمی بر فراوانی طوفان گردوغبار و مهار بیابان‌زایی مفید باشد. همساز با یافته‌های پژوهش عزیزی و همکاران (Azizi, Shamsipour, Miri & Safarrad, 2012) و نبوی و همکاران (Nabavi et al., 2019) فصل بهار و تابستان برای آبادان و اهواز رکورددار در تعداد روزهای گردوغبار بوده است. نتایج پیش‌نگری برای مناطق درگیر با گردوغبار در سال‌های آینده برای ایستگاه آبادان و اهواز طی فصل بهار بیشترین فراوانی گردوغبار را به ترتیب برابر با ۳۲ و ۳۰ روز نشان داد. در مقابل فصل پاییز در همه ایستگاه‌ها فراوانی کمتری را به‌خصوص برای بوشهر با ۲ روز نشان داد. ازنظر مقدار هم شدت گردوغبار در ایستگاه آبادان شدیدتر از بقیه ایستگاه‌ها بوده است که با نتایج پژوهش سبحانی و صفریان زنگیر (Sobhani & Safarian Zengir, 2019) همسو است. همچنین مسیریابی گردوغبار با مدل HYSPLIT و مقایسه نتایج این مدل با عمق اپتیکی گردوغبار و میزان گردوغبار سطحی بر اساس مدل‌های NAAPS و COAMPS تأیید شد.

گردوغبار رخدادی است که از حیث پهنه مکانی بسیار گسترده بوده به‌گونه‌ای که اغلب مطالعات در مورد آن به‌صورت ملی انجام می‌شود. همچنین از بعد زمانی گردوغبار رویدادی به‌شدت متغیر بوده و از ساعتی به ساعت بعد، جایگاه و مسیر حرکت آن دگرگون می‌شود. هر میزان که طوفان گردوغبار برای دوره آماری بلندتر در نظر گرفته شود توانایی مدل بیشتر و داده‌های پیش‌نگری شده نیز از عملکرد بهتری برخوردار خواهند بود؛ بنابراین اگر متغیرهای ورودی مدل با وسواس بیشتری انتخاب گردد دقت مدل‌سازی نیز بیشتر می‌شود. در مقیاس کاربردی مدیران و مسئولان می‌توانند بر اساس مدل‌ها و پیش‌نگری‌های با دقت بالای ارائه شده تصمیمات مناسب و به موقعی را قبل از شروع وضعیت هشدار بگیرند و در ایستگاه‌هایی که دارای پتانسیل بالای گردوغبار هستند پیشگیری‌های لازم را انجام دهند تا در صورت بروز رخداد گردوغبار خسارتی به بار نیاید و یا حداقل اینکه خسارت وارده قابل‌توجه نباشد.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

Abdolshahnejad, M., Khosravi, H., Nazari Samani, A., Zehtabian, G., & Alambaigi, A. (2020). Determining the Conceptual Framework of Dust Risk Based on Evaluating Resilience (Case Study: Southwest of Iran). *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources, 5*(1), 33-44. [In Persian] https://doi.org/10.22047/srjasnr.2020.113050

Aboagye-Sarfo, P., Mai, Q., Sanfilippo, F. M., Preen, D. B., Stewart, L. M., & Fatovich, D. M. (2015). A comparison of multivariate and univariate time series approaches to modelling and forecasting emergency department demand in Western Australia. *Journal of Biomedical Informatics*, 57, 62-73. https://doi.org/10.1016/j.jbi.2015.06.022

Ahmadpour, A., Mirhashemi, S. H., & Panahi, M. (2021). Evaluation of neural network algorithms, and time-series models and SARIMA-SETAR hybrid model in Monthly wind speed prediction. *Journal of Arid Biome*, *10*(2), 131-146. [In Persian] https://doi.org/10.29252/aridbiom.2021.15523.1828

Ahmed, N. K., Atiya, A. F., Gayar, N. E., & El-Shishiny, H. (2010). An empirical comparison of machine learning models for time series forecasting. *Econometric Reviews*, *29*(5-6), 594-621.

Akinci, T. C. (2011). Short Term Wind Speed Forecasting with ANN in Batman, Turkey. *Elektronika Ir Elektrotechnika*, *107*(1), 41-45. https://eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/view/9078

Ansari Ghojghar, M., & Pourmohammad, P. (2025). Implementation of the Tri-Hybrid RBF-GA-SARIMA Meta-Model for Dust Storm Modeling (Case Study: Sistan and Baluchestan Province). *Environmental Management Hazards*, *11*(4), 305-322. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jhsci.2025.387276.859

Ansari Ghojghar, M., Araghinejad, S., Bazrafshan, J., Zahraie, B., & Parsi, E. (2021). Evaluating the Performance of GRU-LSTM Hybrid Model in Predicting the Dust Storms Events (Case Study: Khuzestan Province in Southwest of Iran). *Iran-Water Resources Research*, *17*(1), 16-32. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1400.17.1.2.3

Ansari Ghojghar, M., Bazrafshan, J., & Araghinejad, S. (2022). Evaluating the Efficiency of Hybrid Metamodels of Machine Learning and Box Jenkins in Order to Model Dust Storms (Case Study: Khuzestan Province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *53*(8), 1695-1714. [In Persian] https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.346694.669335

Ansari Ghojghar, M., Pourgholam-Amiji, M., Bazrafshan, J., Liaghat, A., & Araghinejad, S. (2020). Performance Comparison of Statistical, Fuzzy and Perceptron Neural Network Models in Forecasting Dust Storms in Critical Regions in Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *51*(8), 2051-2063. [In Persian] https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.302529.668607

Araghinejad, S. (2013). Data-driven modeling: using MATLAB® in water resources and environmental engineering. *Springer Science & Business Media*, 67. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7506-0

Arjomandi, H., Kheiralipour, K., & Amarloei, A. (2024). Prediction of dust concentration on a laboratory scale using image processing and artificial intelligence technologies. *Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery*, *13*(2), 1-9. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jrmam.2024.14177.642

Azizi, G., Shamsipour, A., Miri, M., & Safarrad, T. (2012). Statistic and Synoptic Analysis of Dust Phenomena in West of Iran. *Journal of Environmental Studies*, *38*(3), 123-134. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jes.2012.29154

Box, G. E. P., Jenkins, G. M., & Reinsel, G. C. (1994). Time series Analysis: Forecasting and Control. 3rdEd, prentice Hall, Englewood Cliffs Inc, *New Jersey*, 598.

Cadenas, E., & Rivera, W. (2010). Wind speed forecasting in three different regions of Mexico ،using a hybrid ARIMA-ANN model. *Renewable Energy*. *35*, 2732-2738. http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.04.022

Dargahian, F., Yasrebi, B., & Khosrowshahi, M. (2022). Study the Dependence Between Climatic Factors and Dust Rise from Inrenal Hotspots in Khouzestan. *Extension and Development of Watershed Management, 9*(35), 11-19. [In Persian] https://www.wmji.ir/article_254170.html

Draxler, R. R. D., & Rolph, G. D. (2003). HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website. http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html

Draxler, R., & Hes G. D. (1998). An overview of the HYSPLIT_4 modeling system for trajectories, dispersion and Deposition. *Australian Meteorological Magazine*, *47*, 295-308.

Draxler, R., Stunder, B., Rolph, G., Stein, A., & Taylor, A. (2009). Hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectories 4 user's guide. NOAA Tech. *aMemo, ERL-ARL*.

Du, P., Huang, Z., Tang, S., Dong, Q., Bi, J., Yu, X., & Gu, Q. (2023). Long-term Variation of Dust Devils in East Asia during 1959-2021. *Authorea Preprints, 128*(9), e2022JD038013. https://doi.org/10.1029/2022JD038013

Ebrahimi-Khusfi, Z., Taghizadeh-Mehrjardi, R., & Nafarzadegan, A. R. (2021). Accuracy, uncertainty, and interpretability assessments of ANFIS models to predict dust concentration in semi-arid regions. *Environmental Science and Pollution Research, 28*, 6796–6810. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10957-z

Farzanehpey, F., Ranjbar-Fordoe, A., Khosravi, H., & Mosavi, S. H. (2024). Evaluation of dust changes and its relationship with temperature (Case study: Khuzestan province). *Integrated Watershed Management, 4*(1), 16-29. [In Persian] https://doi.org/10.22034/iwm.2024.2014553.1112

Fattahi Masrour, P., & Rezazadeh, M. (2022). Spatio-Temporal Distribution of Various Types of Dust Events in the Middle East during the Period 1996-2015. *Journal of the Earth and Space Physics, 47*(4), 231-248. https://doi.org/10.22059/jesphys.2021.321010.1007306

Fotouhi Firoozabad, F., & Malekinejad, H. (2020). Analysis and Zonation of Maximum 24-Hour Rainfall of Iran Using Wakeby Distribution and Geostatistic Technique. *Desert Management, 7*(14), 75-92. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jdmal.2020.38477

Haykin, S. (1994). *Neural Networks: a Comprehensive Foundation*. Prentice Hall PTR. https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/541500

Hosseini Shah Parian, N. L., Firouzi, M. A., & Hosseini Kahnouj, S. R. (2021). Application of artificial neural network and correlation model in predicting dust phenomenon in Ahvaz metropolis. *Quarterly Journal of Human and Environment*, 54, 24-15. [In Persian] https://he.srbiau.ac.ir/article_16835_8bcf6205de3052d5cc91b2916bed3a3e.pdf

Hosseini, A., Alijani, B., & Waghei, Y. (2020). Predicting the Annual Dusty Days in Khorasan Razavi Province Using Spatial-Temporal Analysis. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 8*(4), 103-117. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.79116

Hyndman, R. J., & Khandakar, Y. (2008). Automatic time series forecasting: the forecast package for R. *Journal of Statistical Software, 27*(3), 1-22. https://doi.org/10.18637/jss.v027.i03

Jahanbakhshasl, S., Khorshiddoust, A. M., abbsighasrik, F., & abbasighasrik, Z. (2024). Precipitation, Time Series Models, Man-Kendall, Health Winters model, *West Azerbaijan Province. Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, *24*(75), 98-115. [In Persian] http://dx.doi.org/10.61186/jgs.24.75.10

Karegar, M E., Bodagh Jamali, J., Ranjbar Saadat Abadi, A., Moeenoddini, M., & Goshtasb, H. (2017). Simulation and Numerical Analysis of severe dust storms Iran East. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, *3*(4), 101-119. [In Persian] http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2658-fa.html

Keykhosravi, S. S., Nejadkoorki, F., & Amintoosi, M. (2019). Estimation of Artificial Neural Networks (MLP and RBF) Accuracy in Anticipation of the Dust of the Sabzevar Cement Factory. *Journal of Research in Environmental Health*, *5*(1), 43-52. [In Persian] https://doi.org/10.22038/jreh.2019.38083.1277

Khosroshahi, M., Saeedifar, Z., Shahbazi, K., Zandifar, S., Lotfinasabasl, S., Gohardoust, A., … & Khodagholi, M. (2024). Investigating the trend of temporal and spatial changes of dusty days and determining the contribution of climatic elements on its spread in Iran. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, *30*(4), 521-541. [In Persian] https://doi.org/10.22092/ijrdr.2024.130966

Kim, J. (2019). Particulate Matter Mortality Rates and Their Modification by Spatial Synoptic Classification. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(11), 1904. https://doi.org/10.3390/ijerph16111904

Mahmoudi, L., & Ikegaya, N. (2023). Identifying the Distribution and Frequency of Dust Storms in Iran Based on Long-Term Observations from over 400 Weather Stations. *Sustainability*, *15*(16), 12294. https://doi.org/10.3390/su151612294

Mahmoudi, L., Amiri Doumari, S., Safarianzengir, V., Maleki, R., Kianinejad, S., & Kianian, M. K. (2020). Monitoring and Prediction of Dust and Investigating its Environmental Impacts in the Western Half of Iran and the Eastern Borders of Turkey and Iraq, Using Remote Sensing and GIS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *49*(5), 713-724. https://doi.org/10.1007/s12524-020-01224-2

Mehrabi, S., Soltani, S., & Jafari, R. (2015). Analyzing the Relationship Between Dust Storm Occurrence and Climatic Parameters. *Journal of Water and Soil Science*, *19* (71), 69-81. [In Persian] http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.71.69

Mirzadeh, S. M., Nejadkoorki, F., Moosavi, V., & Mirhoseini, S. A. (2021). Comparison of the accuracy of the support vector regression model with two common methods of artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system in predicting the pollutant concentration of the PM10. *Journal of Natural Environment*, *74*(1), 167-179. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jne.2021.307289.2041

Mohammadpour Penchah, M., Memarian, M. H., & Mirrokni, S. M. (2015). Modeling and Analysis of Dust Storms of Yazd Province Using Numerical Models. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *3*(4), 67-83. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geo.v3i4.34323

Mourianizadeh, S., Khoorani, A., & Sharif, M. (2024). Modeling dust storm based on spectral dust indicators and artificial intelligence in Hormozgan province. *Iranian Journal of Geophysics*, *18*(4), 39-57. [In Persian] https://doi.org/10.30499/ijg.2024.418114.1543

Movahedi, S., Heydari Naserabad, B., Hashemi Ana, S. K., & Ranjbar, B. (2012). Zoning of climatic regions of Khuzestan province. *Quarterly Journal of Geographical Space Research*, *12*(40), 73-64. [In Persian]

Nabavi, S. S., Moradi, H., & Shrifikia, M. (2019). Evaluation of dust storm temporal distribution and the relation of the effective factors with the frequency of occurrence in Khuzestan Province from 2000 to 2015. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, *28*(111), 191-203. [In Persian] https://doi.org/10.22131/sepehr.2019.37518

Negahban, S., Ganjaeian, H., Ghisarian, S. S., & Ebrahimi, A. (2024). Identifying the centers of dust and analyzing the factors influencing its occurrence Based on Remote Sensing Data (Case Study: Southwest Iran). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 13*(4), 386-405. [In Persian] https://doi.org/0.22067/geoeh.2024.89088.1504

Nejadkoorki, F., & Baroutian, S. (2012). Forecasting Extreme PM10 Concentrations Using Artificial Neural Networks. *International Journal of Environmental Research, 6*(1), 277-284. [In Persian] https://doi.org/10.22059/ijer.2011.493

Pourgholam Amiji, M., Ansari Ghojghar, M., Bazrafshan, J., Liaghat, A., & Araghinejad, S. (2020). Comparing the Performance of SARIMA and Holt-Winters Time Series Models With Artificial Intelligence Methods in Dust Storms Forecasting (Case Study: Sistan and Baluchestan Province). *Physical Geography Research, 52*(4), 567-587. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.303847.1007524

Pourgholam-Amiji, M., Ansari Ghojghar, M., & Ahmadaali, K. (2021). Prediction of Dust Storms in Khuzestan Province Using Artificial Neural Networks. *Nivar, 45*(114-115), 56-75. [In Persian] https://doi.org/10.30467/nivar.2021.303747.1200

Pourmaafi Esfahani, E., Almodaresi, A., Mousaei Sanjerehei, M., & Hghparast, H. (2023). Evaluation of dust emission using artificial neural network model of Kashan city. *Environmental Sciences, 21*(2), 69-80. [In Persian] https://doi.org/10.48308/envs.2023.1177

Rahi, G. R., Bahraini, F., KhosroShahi, M., & Biabani, L. (2022). The Effect of Drought on Dust Storm Frequency (Case study: Bushehr Province). *Journal of Water and Soil Conservation, 29*(1), 31-51. [In Persian] https://doi.org/10.22069/jwsc.2022.19677.3511

Safarian Zengir, V., Zenali, B., Jafari Hasi Kennedy, Y., & Jafarzadeh, L. (2018). Investigation of dust and evaluation of its prediction in Ardebil province using ANFIS model. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards, 5*(2), 107-124. [In Persian] http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2771-fa.html

Saligheh, M., & Kakhaki Mehneh, H. (2015). Investigating the Relationship among Climate Factors and Air Pollution Fluctuation (Case Study of the City of Mashhad). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 4*(2), 77-94. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geo.v4i2.31769

Shaiba, H., Alaashoub, N. S., & Alzahrani, A. A. (2018). Applying machine learning methods for predicting sand storms. Paper presented at the Proceedings of the 1st International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS). *Riyadh, Saudi Arabia*. http://dx.doi.org/10.1109/CAIS.2018.8441998

Sobhani, B., & Safarian Zengir, V. (2019). Analysis and prediction of Dust phenomenon in the southwest of Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards, 8*(22), 179-198. [In Persian] https://doi.org/10.22111/jneh.2019.28148.1481

Taghavi, F., Owlad, E., Safarrad, T., & Irannejad, P. (2013). Identifying and monitoring dust storm in the western part of Iran using remote sensing techniques. *Journal of the Earth and Space Physics, 39*(3), 83-96. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jesphys.2013.35600

Xiao, F., Wong, M. S., Lee, K. H., Campbell, J. R., & Shea, Y. K. (2015). Retrieval of dust storm aerosols using an integrated neural network model. *Computers & Geosciences, 85*, 104-114. http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2015.02.016

Zhu, Y. M., Lu, X. X., & Zhou, Y. (2007). Suspended sediment flux modeling with artificial neural network: An example of the longchuanjiang river in the upper yangtze catchment. *Geomorphology, 84*(4), 111-125. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.07.010

Vol.14, No.2, Summer 2025, p. 45-67 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2025.85624.1434 OPEN ACCESS

Synoptic- Ssatellite Analysis of Dust in Kurdistan Province

Seyed Asaad Hosseini[1], Mehdi Rahnama[2], Hamid Bagheri[3], Ali Panahi[4], Bahram Charehkhah[5], Khabat Ghamari[6], Noushin Khoddam[7], Faezeh Noori[8], Saviz Sehat Kashani[9]*

[1&3]Synoptic Meteorology Expert, Kurdistan Province Meteorological Office, Sanandaj, Iran
[2]Associate Professor, Sand and Dust Storm International Research Center, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran
[4]Deputy Director of Development and Forecasting, Kurdistan Province Meteorological Office, Sanandaj, Iran
[5]Deputy Director of Technical and Stations Network, Kurdistan Province Meteorological Office, Sanandaj, Iran
[6]Weather Forecasting Expert, Kurdistan Province Meteorological Office, Sanandaj, Iran
[7&8]Researcher, Sand and Dust Storm International Research Center, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran
[9]*Associate Professor, Sand and Dust Storm International Research Center Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history

Received: 08 September 2024

Revised: 23 October 2024

Accepted: 27 October 2024

Available Online: 12 June 2025

Keywords:

Dust Storms

Synoptic Analysis

Aerosol Optical Depth (AOD)

HYSPLIT Model

Kurdistan Province

ABSTRACT

Dust events have been a serious environmental issue causing annual damage to infrastructure in Kurdistan Province in western of Iran. This study investigated the frequency and source regions of dust events during 1992–2022, indicating an average of approximately 32 dusty days per year. In addition, data from eight weather stations, satellite images, and aerosol optical depth (AOD) products were collected, while the HYSPLIT model was used to track the trajectories of dust particles. The results revealed that the highest dust activity occurred in spring (40%), followed by summer (27%). The intensity of dust decreases from west to east and from north to south. The examination of this event shows that dust forms and moves due to low-pressure systems over Iraq and Syria, along with unstable weather conditions. Most dust originates from sediments in riverbeds and dried wetlands in central and southern Iraq. Additional sources include deserts in Syria, Jordan, and the northern Arabian Peninsula, which produce increased dust during spring and summer.

*Corresponding Author's: Dr. Saviz Sehat Kashani E-mail address: savizsehat@yahoo.com

How to cite this article: Hosseini, S. A., Rahnama, M., Bagheri, H., Panahi, A., Chehkhah, B., Ghamari, Kh., … & Sehat Kashani, S. (2025). Synoptic- Satellite Analysis of Dust in Kurdistan Province. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(2), 45-67. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.85624.1434

©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

According to the World Meteorological Organization, dust storms are atmospheric phenomena that typically occur in arid and semi-arid regions with wind speeds exceeding 15 m/s. Dust storms usually consist of particles ranging from 0.5 to 0.1 mm and even smaller, which move in a saltation or suspended manner and can travel long distances. Due to its climatic conditions and proximity to desert regions in the east, northeast, west, and southwest, Iran frequently experiences this phenomenon. The incidence of dust storms has increased over recent decades across most parts of the country, including Kurdistan Province. Given the substantial environmental and economic impacts of dust storms, which are considered natural hazards, this study aims to examine the synoptic conditions and satellite imagery of dust events in Kurdistan Province to identify their origins and dominant patterns.

Material and Methods

The study area is Kurdistan Province, covering 28,203 km² in western Iran. This research employed statistical and synoptic analyses using data from eight synoptic meteorological stations across the province. Dust event data (coded as 06) were collected at 3-hour intervals (SYNOP reports) over a 31-year period (1992–2022). Additionally, geopotential height data at 500, 700, and 850 hPa levels, sea level pressure (SLP), and vector wind data were obtained from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Gridded datasets were processed and analyzed using factor analysis and hierarchical clustering (Ward's method) to identify the prevailing synoptic patterns associated with dust generation. For a detailed case study, the large-scale dust storm occurring from July 4 to 7, 2009, was selected. In addition to synoptic analysis, Aerosol Optical Depth (AOD) was retrieved using the MOD04 L1B product from the MODIS sensor on the Terra satellite. AOD at 550 nm was analyzed using a combination of the Deep Blue and Dark Target algorithms to assess the presence of suspended dust particles. Furthermore, the HYSPLIT model was used for backward trajectory analysis at 500, 1000, and 1500 meters to trace the origin and pathway of dust-laden winds during the storm.

Results and Discussion

The analysis of dust frequency across stations revealed that Baneh (in the west) recorded the highest average of 48 dust days per year, while Kamyaran (in the south) had the lowest with 25 days. Overall, Kurdistan Province experiences an average of 32 dust days annually. Spatial distribution patterns showed that the western and central regions are more affected by dust events compared to the eastern parts, while northern regions experience more dust days than southern ones.

Three dominant synoptic patterns associated with dust events were identified based on 500 hPa geopotential height data. These patterns commonly involve low-pressure systems over Iraq and Syria, which enhance atmospheric instability over nearby deserts and position Kurdistan within the influence of deep troughs—creating favorable conditions for dust transport.

The dust storm of July 5, 2009, analyzed through AOD imagery, showed higher values in the western parts of Kurdistan and lower values in the northern and eastern parts. The AOD retrieval using Deep Blue and Dark Target algorithms effectively detected dust-affected areas. The storm's source regions were identified as the deserts of Iraq, Syria, Jordan, Saudi Arabia, and the broader Mesopotamian plain.

Combined analysis of satellite images and HYSPLIT trajectory modeling revealed three main dust sources affecting Kurdistan:

1. Primary Source: Central Iraq—particularly sediment-rich riverbeds and dried ponds—as well as Jordanian deserts, most active in spring and associated with the most severe events.
2. Secondary Source: Northern Iraq and eastern Syria, with moderate contributions during spring and summer.

3. Tertiary Source: Southern Iraq and northeastern Saudi Arabia, which predominantly affect the region in the warm season but may contribute less frequently during colder months.

Conclusion

Statistical analysis confirmed that the spatiotemporal distribution of dust days across Kurdistan is shaped by both topographic features and distance from dust sources, with a west-to-east decreasing trend in frequency. Seasonally, spring and summer account for the majority of dust activity 40% and 27% respectively though events occur throughout the year at lower intensities.

Baneh station reported the highest total number of dust days (1111), while Kamyaran recorded the lowest (405) during the 31-year period. Synoptic analysis revealed three distinct atmospheric patterns contributing to dust events. AOD measurements confirmed that dust concentrations are higher in the western parts of the province. Dust tracking via satellite imagery and HYSPLIT confirmed the region's primary external sources: central and southern Iraq, northern Saudi Arabia, and deserts in Jordan and Syria.

Acknowledgements

We sincerely thank our colleagues at the Kurdistan Meteorological Administration and the Research Institute of Meteorology and Atmospheric Sciences for their support and assistance in conducting this research.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص۶۷-۴۵

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2025.85624.1434 دسترسی آزاد

واکاوی همدیدی و ماهواره‌ای گرد و خاک در استان کردستان

سید اسعد حسینی[۱]، مهدی رهنما[۲]، حمید باقری[۳]، علی پناهی[۴]، بهرام چاره خواه[۵]، خه‌بات قمری[۶]، نوشین خدام[۷]، فائزه نوری[۸]، ساویز صحت کاشانی[۹*]

[۱و۳] کارشناس هواشناسی همدیدی، اداره کل هواشناسی استان کردستان، سنندج، ایران

[۲] دانشیار، مرکز بین‌المللی مطالعات توفان ماسه و گردوخاک، رئیس پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

[۴] معاون توسعه و پیش‌بینی، اداره کل هواشناسی استان کردستان، سنندج، ایران

[۵] معاون فنی و شبکه ایستگاه‌ها، اداره کل هواشناسی استان کردستان، سنندج، ایران

[۶] کارشناس پیش‌بینی، اداره کل هواشناسی استان کردستان، سنندج، ایران

[۷و۸] پژوهشگر، مرکز بین‌المللی مطالعات توفان ماسه و گردوخاک، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

[۹] *دانشیار، مرکز بین‌المللی مطالعات توفان ماسه و گردوخاک، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۶

کلمات کلیدی:

طوفان‌های گرد و خاک

تحلیل‌های سینوپتیک

عمق نوری ذرات معلق(AOD)

HYSPLIT

چکیده

پدیده گردوخاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات جوی و زیست‌محیطی، استان کردستان واقع در غرب کشور را متأثر ساخته و هرساله خسارات زیادی را به زیرساخت‌های مختلف در این استان وارد کرده است. در این مقاله شرایط و منشاء شکل‌گیری رخدادهای گردوخاک در استان کردستان با میانگین ۳۲ روز گردوخاکی در سال برای دوره آماری ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ با استفاده از روش‌های تحلیل ترکیبی آماری – همدیدی و ماهواره‌ای مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور از داده‌های مشاهداتی ۸ ایستگاه همدیدی، محصولات ماهواره‌ای، عمق نوری ذرات معلق (AOD) و داده‌های بازکاوی برای ترازهای مختلف جو استفاده شد. همچنین با استفاده از مدلHYSPLIT، مسیرهای انتقال ذرات گردوخاک رهگیری و درنهایت چشمه‌های عمده گردوخاک استان تعیین شد. بر اساس نتایج، فصول بهار با ٪۴۰ و تابستان با ٪۲۷ از بیشترین تعداد روزهای همراه با پدیده گردوخاک برخوردارند. پراکنش مکانی گردوخاک نشان داد با حرکت از غرب به شرق و از شمال به جنوب استان تعداد روزهای گردوخاکی کاهش می‌یابد. با توجه به بررسی‌های همدیدی در بیشتر موارد استقرار یک سامانه کم‌فشار بر روی عراق و سوریه و تقویت شرایط ناپایداری در سطح بیابان‌های این مناطق و همچنین قرارگیری منطقه موردمطالعه در جلوی ناوه عمیق، زمینه انتقال گردوخاک به جو منطقه را فراهم می‌آورد. براساس نتایج پدیده گردوخاک در استان کردستان از ۳ چشمه اصلی شامل رسوبات کف رودخانه‌ها و هورهای خشک‌شده در نواحی مرکزی و جنوبی عراق و

بیابان‌های سوریه، اردن و شمال شبه‌جزیره عربستان منشاء می‌گیرد. بیشترین فعالیت این چشمه‌های گردوخاک نیز در فصل‌های بهار و تابستان است.

* نویسنده مسئول: دکتر ساویز صحت کاشانی E-mail: savizsehat@yahoo.com

مقدمه

توفان گردوخاک یکی از پدیده‌های جوی است که بنا بر تعریف سازمان هواشناسی جهانی معمولاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک همراه با سرعت باد بیش از ۱۵ متر بر ثانیه رخ می‌دهد (Goudie & Middleton, 2006). وزش باد سبب جدا شدن ذرات خاک با اندازه‌های مختلف از بستر خود شده که به‌صورت جهش، خزش و یا معلق به حرکت درآمده و به نقاط دوردست منتقل شده و سبب فرسایش خاک در مناطق برداشت و متناسب با قدرت و سرعت باد سبب انباشت رسوبات در نقاط دیگر می‌شود (Refahi, 2004; Ardalan & Rahimzadegan, 2015). توفان‌های ماسه[1] معمولاً از ذرات درشت با اندازه بزرگ‌تر از ۰/۵ میلی‌متر یا ۵۰۰ میکرون تشکیل شده‌اند که امکان جابه‌جایی مسافت طولانی را ندارند. حرکت این ذرات به‌صورت خزشی است به‌گونه‌ای که این ذرات از بستر خاک جدا نمی‌شوند و با نیروی باد بر روی سطح خاک غلطانده می‌شوند. درحالی‌که توفان‌های گردوخاک[2] عموماً از ذرات ۰/۵ تا ۰/۱ و کوچک‌تر از ۰/۱ میلی‌متر تشکیل شده‌اند که به‌صورت جهشی یا معلق حرکت نموده و می‌توانند مسافت‌های طولانی را طی کنند (USEPA, 2001). بسیاری از کشورهای واقع در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان با توجه به وجود بیابان‌های گسترده و فاقد پوشش گیاهی مناسب، تغییر کاربری زمین و نبود فناوری مناسب برای سازگاری با خشکسالی‌های شدید و پیامدهای ناشی از آن تحت تأثیر رخدادهای گردوخاک قرار گرفته‌اند (Hejazizadeh, Khosravi, Hosseini, Rahimi & Karbalaee doree, 2021; Lashkari & Mohammadi, 2022). کشور ایران نیز با توجه به شرایط اقلیمی و موقعیت بیابان‌های واقع در کشورهای هم‌جوار شرقی، شمال شرقی، غربی و جنوب غربی آن، با این پدیده مواجه بوده است که در چند دهه اخیر میزان رخداد آن در بیشتر مناطق کشور ازجمله استان کردستان افزایش پیدا کرده است (Esfandyari darabad, Hosseini & Mohammadpour, 2013).

ازآنجاکه پدیده گردوخاک زندگی جوامع انسانی را متحمل هزینه‌های هنگفت می‌کند و به‌عنوان یک مخاطره طبیعی در نظر گرفته می‌شود (Middleton, Tozer & Tozer, 2019)، مطالعه و بررسی جنبه‌های مختلف آن موردتوجه محققان داخلی و خارجی قرار گرفته است. به‌منظور نظارت و پایش گردوخاک در شمال غرب چین از داده‌های سنجنده MODIS استفاده شد و نتایج نشان داد که که گردوخاک از غرب استان مغولستان داخلی به سمت مرکز مغولستان داخلی حرکت کرده است (Dia, 2005). کو و همکاران (Qu, Hao, Kafatos & Wang, 2006)، نیز با استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور ماهواره‌ای و با ترکیب باند بازتابی نور خورشید به‌دست‌آمده از تصاویر MODIS ماهواره‌های آکوا و ترا توانسته‌اند توفان‌های گردوخاکی را از ابرها متمایز کنند. آنوفوروم (Anuforom, 2007) با مطالعه همدیدی و بررسی الگوهای روزانه هوا بر روی سواحل غربی آفریقا در یک دوره ۳۰ ساله به این نتیجه رسید که بیشترین گردوخاک در این منطقه در ماه نوامبر تا فوریه است که بر اثر بادهای تجارتی شمال شرق از جنوب صحرا آفریقا به این منطقه حمل می‌شوند. لی و همکاران (Li, Ge, Dong & Chang, 2010) داده‌های سنجنده MODIS را به‌منظور پایش توفان گردوخاک در استرالیا به کار برد و از طریق محاسبات اختلاف درجه حرارت روشنایی دو باند حرارتی مادون‌قرمز موفق به جدا کردن گردوخاک از ابرها شدند و گردوخاک پخش‌شده را بازیابی و تخمین زدند. رضازاده و همکاران (Rezazadeh, Irannejad & Shao, 2013) در بررسی اقلیم‌شناسی رخدادهای گردوخاک در خاورمیانه نشان دادند که بیشترین رخداد گردوخاک در بخش غربی

1-Sand Storms

2- Dust Storms

خاورمیانه در ماه‌های زمستان و در بخش شرقی در ماه‌های تابستان اتفاق می‌افتد. کائو و همکاران (Cao, Jian, Guizhou, Guang & Lei, 2015) نیز با رویکرد جدید شناسایی منابع گردوخاک در ایران با استفاده از ۹ مجموعه داده همچون رخدادهای خشکسالی، دما، بارش، موقعیت خاک‌های شنی، فراوانی توفان‌های گردوخاک ناشی از تخریب انسان، شاخص تأثیر انسان، راندمان استفاده از باران و حاصلخیزی خاک لُس نشان دادند که دو منبع بزرگ در تالاب‌های هویزه و یا هورالعظیم و دشت سیستان به‌عنوان دو منبع گردوخاک داخلی شناخته شده‌اند. بیدختی و همکاران (Bidokhti, Gharaylou, Pegahfar, Sabetghadam & Rezazadeh, 2016) رخدادهای شدید گردوخاک را برای دو منطقه شهری کرمانشاه و تهران بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از داده‌های همدیدی، غلظت گردوخاک و مدل HYSPLIT به این نتیجه رسیدند که رخدادهای گردوخاکی عمدتاً زمانی به وقوع می‌پیوندد که در وردسپهر زیرین سرعت باد زیاد و میزان رطوبت کم باشد. بررسی مدل رهگیری نیز نشان داد که وقایع گردوخاکی از بیابان‌های عراق و سوریه منشأ گرفته‌اند. فرانسیس و همکاران (Francis et al., 2017) باد شَمال و نقش آن‌ها در انتشار گردوخاک عراق را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بین بادهای سطح زمین و بادهای تراز زیرین وردسپهر ارتباط وجود دارد. جین و همکاران (Jin, Wei, Pu, Yang & Parajuli, 2018) در مشاهدات درازمدت ماهواره‌ای و توزیع ذرات معلق بر روی دریای عرب نشان دادند که یک ناهمگونی فصلی و سالانه در طی فصل تابستان بر روی دریای عرب وجود دارد که ناشی از تغییرات قابل‌ملاحظه در چرخه گردوخاک مناطق مجاور است که با پدیده‌های هواشناسی و تغییرات سالانه الگوهای گردش جوی ارتباط قوی دارند. ریرز و همکاران (Reyers, Hamidi & Shao, 2019) به واکاوی همدیدی و شبیه‌سازی رویدادهای گردوخاک در بیابان‌های آتاکاما پرداختند. بر اساس نتایج ناوه میانی وردسپهر منجر به تشکیل یک نوار همگرایی افقی بر فراز آتاکامای شمالی و درنتیجه باد رو به پایین در زیر آن می‌شود و تضاد دمایی شدید در غرب آند رخ می‌دهد که منجر به بادهای فوق‌العاده شدید در آتاکاما می‌شود. الخلیدی و همکاران (Al-Khalidi, Bakr & Abdullah, 2021) به تحلیل همدیدی توفان‌های گردوخاک در عراق پرداختند. بر اساس نتایج بیابان‌های شرق سوریه، ربع‌الخالی و منطقه بین النهرین از منابع اصلی گردوخاک در عراق هستند. شمشیری (Shamshiri, 2012) به پهنه‌بندی گردوخاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و الگوریتم‌های تفکیک و استخراج گردوخاک مانند آکرمن و TDI[1] در استان کرمانشاه پرداخت. نتایج حاکی از دقت بالای تصاویر سنجنده MODIS در ثبت ذرات گردوخاک و نیز دقت بالای الگوریتم TDI در تفکیک و استخراج مناطق دارای گردوخاک از غیر گردوخاک داشت. رضائی بنفشه و همکاران (Rezaee Banafsheh, Dharifi & Pirkhazraian, 2012) با استفاده از تصاویر و محصولات سنجنده TOMS بر روی ماهواره Nimbus7 نشان دادند که روند تغییرات رخدادهای گردوخاک شدید در استان کردستان طی سال‌های اخیر افزایش یافته درحالی‌که فراوانی رخدادهای گردوخاک با شدت متوسط روند کاهش داشته است. اسلامی و همکاران (Eslami, Atafar, Pirsahab & Asadi, 2014) به بررسی روند تغییرات غلظت ذرات معلق در شهر کرمانشاه پرداختند. نتایج نشان داد که تغییرات غلظت در کل دوره موردبررسی فقط ازنظر فصل و ماه متفاوت است و بدترین کیفیت هوا در تیرماه اتفاق می‌افتد. قوامی و همکاران (Qhavami, Kaboodvandpour, Mohammadi & Amanollahi, 2014) با بررسی مقادیر روزانه PM^{2}_{10} در سنندج و نیز بررسی الگوهای جوی در ترازهای مختلف نشان دادند که با استقرار یک ناوه نسبتاً عمیق در نواحی شرقی دریای مدیترانه و گسترش هوا از روی مناطق خشک به سمت ایران هم‌زمان با حضور یک مرکز پرارتفاع روی عربستان به‌ویژه در فصول گرم سال سبب شکل‌گیری توفان‌های گردوخاک و انتقال توده‌های گردوخاکی به داخل کشور می‌شود. صحت کاشانی و همکاران (Sehatkashani, VazifeDoust, Kamali & Bidokhti, 2015) به تحلیل همدیدی رخدادهای گردوخاک در نواحی غربی و جنوب غربی کشور پرداختند. نتایج نشان داد استقرار سامانه کم‌فشار مدیترانه‌ای در مناطق غرب و جنوب غرب ایران به همراه سامانه پر ارتفاع جنب‌حاره بر روی کشور منجر به شکل‌گیری رخداد گردوخاک در فصل بهار می‌شود.

1 -Temperature Drought Index

2-Particle Matter

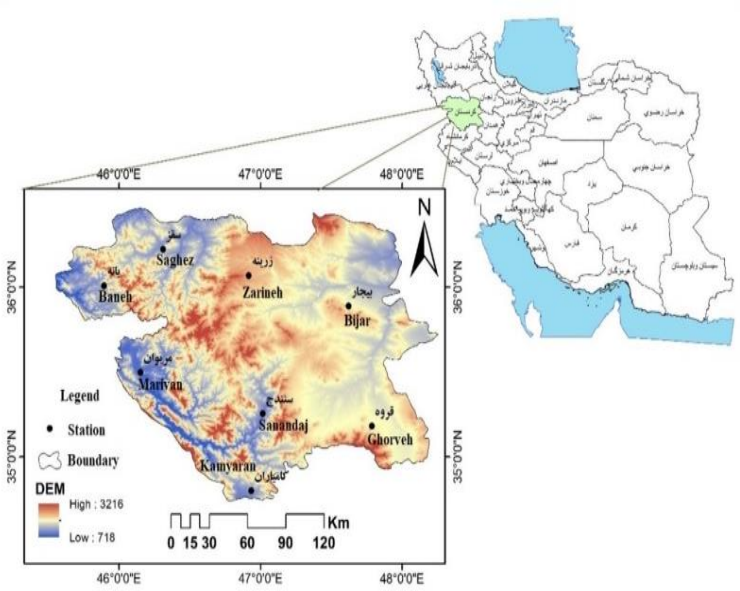
مشکی‌زاده و همکاران (Meshkizadeh, Orak & Morshedi, 2016) به بررسی توزیع زمانی و مکانی عمق نوری ذرات معلق [1] (AOD) در استان خوزستان پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که تغییرات مکانی AOD از روند خاصی پیروی می‌کند و بر این اساس تغییرات ذرات معلق هوا در شهرستان‌های غربی استان خوزستان بسیار بیشتر است. صلاحی و همکاران (Salahi, Nohegar & Behrouzi, 2019) نیز در مطالعه خود با استفاده از مدل HYSPLIT یک رخداد توفان گردوخاک را در شهر سنندج را مسیریابی و مشاهده کردند چشمه این رخداد در نواحی بیابانی عراق و سوریه بوده است. همچنین با بررسی رخدادهای گردوخاک در بازه زمانی ۲۴ ساله نشان دادند روند تغییرات فراوانی این پدیده در سنندج افزایشی است. سلطانی و همکاران (Soltani, Motamedvaziri, Noroozi, Ahmadi & Mosaffaei, 2021) به شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر ایجاد گردوخاک در شهرستان هندیجان پرداختند. نتایج نشان داد که رشد جمعیت، توسعه کشاورزی، توسعه دامداری، توسعه صنعتی و تغییر اقلیم، از مهم‌ترین پیشران‌های مؤثر بر وضعیت رخداد گردوخاک در منطقه هستند. چوبین و همکاران (Choubin, Sajedi Hosseini, Rahmati, Mehdizadeh Youshanloei & Jalali, 2022) به بررسی تغییرات زمانی و مکانی وقوع گردوخاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در استان آذربایجان غربی پرداختند. نتایج نشان داد بیشترین وقایع گردوخاک در فصل‌های تابستان و بهار به وقوع پیوسته و نوسان‌های ماهانهٔ گردوخاک نشان‌گر بیشینهٔ گردوخاک از ماه اسفند تا مهر است. حسینی و همکاران (Hosseini, Khoramabadi & Tahani Yazdly, 2024) به بررسی تغییرات زمانی و مکانی مخاطره گردوغبار در استان کردستان پرداختند. نتایج نشان داد که فصل تابستان و ماه‌های تیر و مرداد، دارای بیشترین تراکم و غلظت گردوغبار و پس‌ازآن، فصل بهار در رتبه دوم قرار دارد. بر اساس نتایج افزایش میزان گردوغبار در این دو فصل می‌تواند به دلیل استقرار پرفشار جنب‌حاره‌ای آزور و خشکی هوا به علت کمی رطوبت سطحی در ایران و کشورهای هم‌جوار باشد. محمدپور و همکاران (Mohammadpour, Saligheh, Raziei & Darvishi Bloorani, 2024) به بارزسازی پدیده‌های حدی گردوخاک در استان کردستان با استفاده از مدل MACC و صحت سنجی داده‌های MODIS پرداختند. نتایج نشان داد که زمستان و پاییز دارای کمترین و فصل بهار و تابستان دارای بیشترین مقدار AOD است.

امروزه به‌وسیله داده‌های ماهواره‌ای بسیاری از کمیت‌های موردنیاز مطالعه گردوخاک‌ها مانند، غلظت آن‌ها، عمق نوری، دمای توده گردوخاک، تابش خالص رسیده به زمین و غیره را می‌تواند به دست آورد مزیت این داده‌ها آن است که سطح وسیعی را پوشش می‌دهند و برای مطالعات و تحقیقات منطقه‌ای کاربرد خوبی دارند (Rostami & Hosseini, 2018). بنابراین با توجه به اهمیت موضوع در این پژوهش به واکاوی آماری- همدیدی و ماهواره‌ای گردوخاک در استان کردستان با هدف منشاءیابی این پدیده پرداخته شده است.

منطقه مورد مطالعه

منطقه موردمطالعه در این مقاله استان کردستان است که با مساحت ۲۸۲۰۳ کیلومتر در غرب ایران و در مجاورت کشور عراق بین ۳۴ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد (Khodakarami, Hooshyar, Javid & Hosseini, 2022). روش موردمطالعه در این مقاله به‌صورت آماری- تحلیلی بوده و در جهت دستیابی به اهداف تعیین‌شده از آمار ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی در منطقه موردمطالعه استفاده شده است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی موردبررسی را نشان می‌دهد.

1-Aerosol Optical Depth



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه موردمطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی موردبررسی

Fig. 1. Geographical location of the study area and meteorological stations under study

مواد و روش‌ها

داده‌های موردنیاز، گزارش‌های پدیده گردوخاک با کد ۰۶ (گردوخاک معلق و گسترده در هوا که منشأ محلی ندارد) ایستگاه‌های همدیدی به‌صورت سه‌ساعته (سینوپ) در دوره آماری بلندمدت ۳۱ ساله (۱۹۹۲-۲۰۲۲) را در برمی‌گیرد. همچنین داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیلی ترازهای ۵۰۰، ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکالی، فشار تراز سطح دریا (SLP) و سمت و سرعت باد در محدوده جغرافیایی ۰ تا ۶۰ درجه عرض شمالی و ۱۰ تا ۷۰ درجه طول شرقی از تارنمای مرکز ملی جوی و اقیانوسی (NOAA) اخذ شد. روزهای موردمطالعه در دوره آماری موردبررسی به‌گونه‌ای انتخاب گردید که بیشترین تداوم و بیشترین گستردگی را در سطح منطقه موردمطالعه داشته باشد تا بتوان رخدادهای گردوخاک را با دقت بیشتر مورد واکاوی قرار داد. برای انتخاب نمونه‌های رخداد گردوخاک موردمطالعه معیارهای زیر مدنظر قرار گرفت:

۱- نمونه‌ها بر اساس گزارش کد ۰۶ در تمام ساعات همدیدی و تداوم زمانی دو روز و بیشتر از آن انتخاب شدند.

۲- گسترش مکانی گردوخاک در ۴ ایستگاه (۵۰ درصد ایستگاه‌ها) یا بیشتر از آن به‌طوری‌که روزهای انتخابی به‌گونه‌ای باشد که درمجموع رخدادهای گردوخاک از پراکنش مناسبی در سطح استان کردستان برخوردار باشند.

۳- رسیدن دید به ۱۰۰۰ متر و کمتر از آن در اثر گردوخاک در ایستگاه‌های نزدیک به منشأ گردوخاک، چراکه در ایستگاه‌های دورتر ممکن است براثر فاصله گرفتن از مناطق منشأ در صورت وجود گردوخاک دید به بالای ۱۰۰۰ متر نیز برسد.

به‌این‌ترتیب ۴۰ روز گردوخاک منتخب در دوره آماری (۱۹۹۲-۲۰۲۲) استخراج گردید. داده‌های دریافت‌شده در محیط نرم‌افزار اکسل به‌صورت مجموعه داده لازم تنظیم و وضعیت روزهای همراه با گردوخاک به‌صورت میانگین و فراوانی برای هر ایستگاه در قالب نمودار مشخص شد. همچنین با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) پراکنش مکانی فراوانی روزهای گردوخاک در سطح استان تعیین شد. ازآنجاکه فاصله تلاقی داده‌های NCEP از هم ۲/۵ × ۲/۵ درجه جغرافیایی است. ماتریسی از شبکه نقاط مذکور به ابعاد ۲۵ ردیف در ۲۹ ستون با مجموع ۷۲۵ برای ۴۰ روز منتخب همراه با گردوخاک، موردمطالعه و ارزیابی قرار گرفت.

پس از استخراج داده‌های شبکه‌ای و مرتب کردن آن‌ها با استفاده از روش تحلیل عاملی و روش تحلیل خوشه‌ای به تجزیه‌وتحلیل داده‌ها پرداخته شد و الگوهای همدیدی غالب مولد گردوخاک در منطقه شناسایی گردید. در ادامه برای بررسی رخداد یک توفان گسترده با تداوم چندروزه (توفان چهارم تا هفتم ژوئیه ۲۰۰۹) علاوه بر واکاوی همدیدی به بررسی AOD با استفاده از محصول MOD04 L1B سنجنده MODIS ماهواره ترا پرداخته شد و جهت شناسایی وجود ذرات معلق در جو در توفان مذکور از AOD در باند نوری ۵۵۰ نانومتر و ترکیب الگوریتم‌های Deep Blue و Dark Target استفاده شد. عمق نوری کمتر از ۰/۱ نشان‌دهنده هوای صاف و عمق نوری بیشتر از ۴ بیانگر حضور حجم متراکمی از ذرات معلق است که مانع از رسیدن نور خورشید حتی در میانه روز به سطح زمین می‌شوند (Ginoux, Prospero, Gill, Hsu & Zhao, 2012؛ Hsu, Tsay, King & Herman, 2006). علاوه بر این برای ردیابی مسیر باد در توفان مذکور از مدل HYSPLIT به‌صورت پسگرد و در ارتفاع‌های ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متر استفاده شد. مدل HYSPLITیکی از کامل‌ترین مدل‌ها برای محاسبات خط سیر حرکت ذرات گردوغبار در اندازه‌های مختلف در شرایط متفاوت جوی، پراکندگی و ته‌نشینی آن در مقیاسی وسیع است (Draxler, Stunder, Rolph, Stein & Taylor, 2009; Ellis Jr & Merrill, 1995).

پس از جمع‌آوری و تنظیم داده‌های ارتفاعی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به‌صورت آرایه (S-mode) و قبل از انجام تحلیل عاملی، ابتدا اعتبارسنجی انجام تحلیل عاملی برای ۷۲۵ متغیر موردمطالعه آزمون شد. جدول ۱ نتایج اعتبارسنجی را برای ماتریس داده‌های مذکور نشان می‌دهد. ازآنجاکه مقدار آماره KMO برابر ۰/۹۲ شد و نزدیک به یک است انجام تحلیل عاملی مناسب تشخیص داده شد و مورد تأیید قرار گرفت.

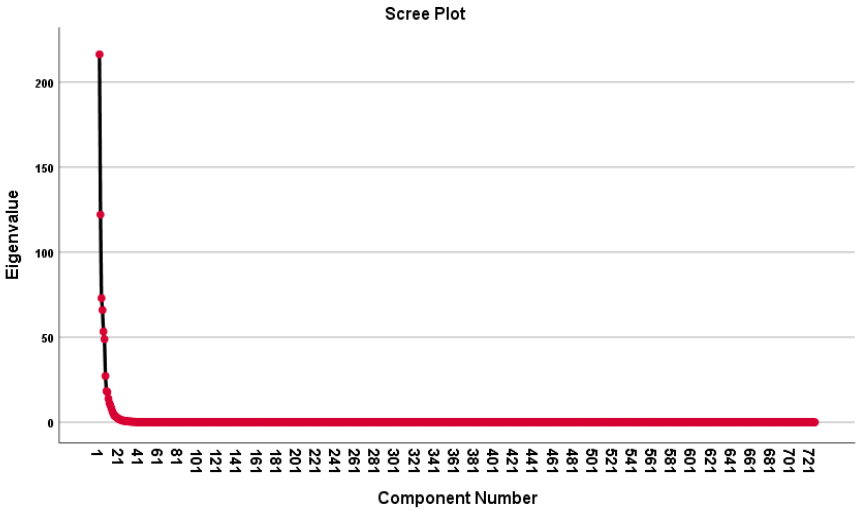
جدول ۱- مقادیر آماره کایزر- مایر- اولکین (KMO)

Table 1- Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) statistic values

اندازه‌گیری کفایت نمونه‌گیری کایزر- مایر- اولکین **Kaiser-Meyer-Olkin measure of sampling adequacy**		0.922
آزمون بارتلت Bartlett's Test	خی دو Chi-square	115345.024
	درجه آزادی Degrees of freedom	724
	سطح معنی‌داری Significance level	0.000

سپس در راستای رسیدن به اهداف کلی این مطالعه طی دوره‌ی ۳۱ ساله (۱۹۹۲-۲۰۲۲) پس از اعمال روش تحلیل عاملی بر روی ماتریس کوواریانس داده‌های تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال روزهای همراه با گردوخاک، سیزده عامل که درمجموع، ۹۴/۶ درصد از کل واریانس داده‌ها را تبیین می‌کردند استخراج شدند (جدول ۲) و مابقی عواملی را که ارزش ویژه آن‌ها کمتر از یک بود و نتوانسته بودند بیشتر از یک درصد کل واریانس داده‌ها را تبیین کنند، کنار گذاشته شدند (شکل ۲). نمودار مذکور تغییرات مقادیر ویژه را که بر اساس محاسبه ماتریس کوواریانس به‌دست‌آمده برحسب اهمیت از بزرگ به کوچک را برای همه متغیرها نشان می‌دهد. همچنان که مشاهده می‌شود، بر اساس نمودار مذکور فاصله یا شباهت بین خوشه‌ها بعد از عامل سیزدهم کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. بنابراین، نقطه افت منحنی در عامل سیزدهم تشخیص داده شد. دراین‌بین، با توجه به این‌که عامل اول توانست به‌تنهایی ۲۹/۸ درصد کل واریانس داده‌ها را تبیین کند و بررسی اجمالی جدول ماتریس همبستگی بین عامل‌های استخراج‌شده هم حاکی از عدم وجود وابستگی بین آن‌ها بود و عامل‌ها از همدیگر استقلال کامل داشتند، مدل مذکور پذیرفته شد (جدول ۲)؛

اما با توجه به این‌که مهم‌ترین ویژگی روش تجزیه‌ی عاملی این است که بتواند رابطه‌ی بین متغیرهای اولیه و عامل‌های ایجادشده را به‌صورت واضح و ساده بیان کند و عامل‌های ایجادشده ازنظر علمی (اقلیم‌شناسی همدیدی) قابل توجیه و بهتر تفسیر شوند، عامل‌های مذکور به روش چرخش متعامد (واریماکس) دوران داده شدند. جدول ۲ مقادیر کل واریانس تبیین شده توسط عامل‌ها را در حالت قبل و بعد از چرخش متعامد عامل‌ها را نشان می‌دهد که تفاوت چندانی ندارند.



شکل ۲- نمودار اسکری تغییرات مقادیر ویژه برحسب اهمیت برای کل متغیرها

Fig. 2. Scree plot of eigenvalue variation based on importance for all variables

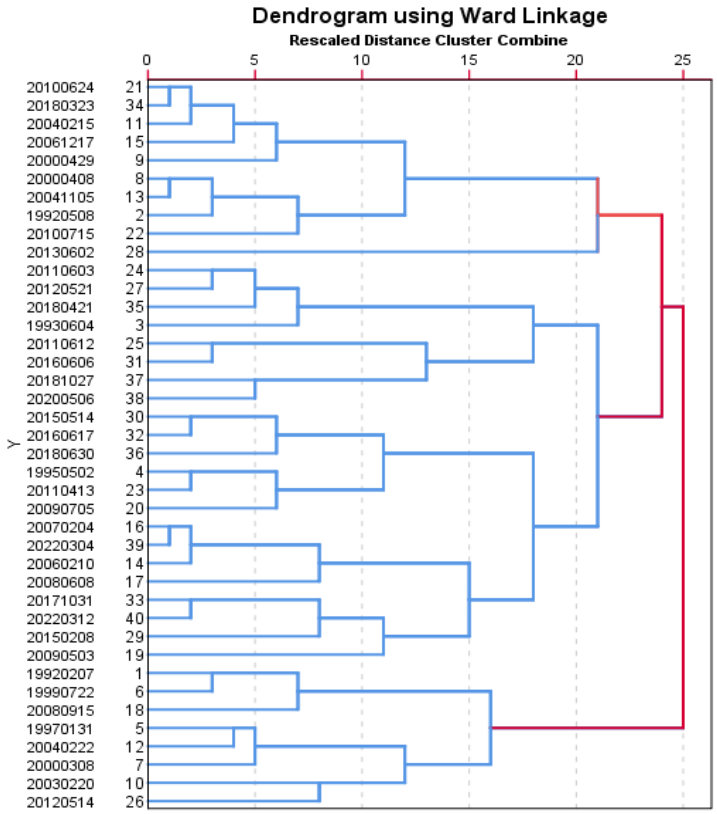
جدول ۲- مقدار ویژه، درصد واریانس و واریانس تجمعی هر یک از عامل‌ها

Table 2- Eigenvalue, percentage of variance, and cumulative variance for each factor

عامل Factor	مقادیر ویژه اولیه Initial eigenvalues			مجموع مجذور عامل‌های اکتشافی Rotation Sum of squared loadings		
	مجموع Total	%واریانس Variance	% تجمعی Cumulative	مجموع Total	%واریانس Variance	% تجمعی Cumulative
1	216.276	29.831	29.831	216.276	29.831	29.831
2	122.076	16.838	46.669	122.076	16.838	46.669
3	72.991	10.068	56.737	72.991	10.068	56.737
4	65.950	9.097	65.834	65.950	9.097	65.834
5	53.350	7.359	73.192	53.350	7.359	73.192
6	48.846	6.737	79.929	48.846	6.737	79.929
7	27.178	3.749	83.678	27.178	3.749	83.678
8	18.286	2.522	86.200	18.286	2.522	86.200
9	17.689	2.440	88.640	17.689	2.440	88.640
10	13.891	1.916	90.556	13.891	1.916	90.556
11	11.272	1.555	92.111	11.272	1.555	92.111
12	9.967	1.375	93.486	9.967	1.375	93.486
13	8.206	1.132	94.618	8.206	1.132	94.618
14	6.358	0.877	95.495	6.358	0.877	95.495
15	5.117	0.706	96.201	5.117	0.706	96.201

در ادامه، پس از انجام تحلیل خوشه‌ای به روش سلسله مراتبی وارد بر روی نمرات عاملی حاصل، ازآنجاکه میزان مربع فواصل اقلیدسی خوشه‌های ادغام‌شده از عدد ۲۲ به بعد افزایش ناگهانی پیدا کرده و سبب کاهش شباهت الگوهای همدیدی نماینده‌ی روزهای همراه با گردوخاک واقع در خوشه‌ها می‌شود، لذا ادغام خوشه‌ها در فاصله‌ی مذکور متوقف شد و کل روزهای همراه با گردوخاک منتخب در سه گروه طبقه‌بندی شدند. شکل ۳ نمودار درختی ادغام خوشه‌ها را همراه با خط افقی محدودکننده‌ی خوشه‌ها در مربع فاصله اقلیدسی ۲۲ نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که بر اساس خط مذکور ادغام خوشه با سه خوشه نهایی متوقف خواهد شد.

بر اساس تحلیل داده‌های ارتفاعی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال روزهای همراه با گردوخاک با استفاده از روش تحلیل عاملی و روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی وارد، سه الگوی همدیدی حاکم بر روزهای همراه با گردوخاک شناسایی و تعیین شد که توضیحات هرکدام از الگوهای سه‌گانه در ادامه به‌تفصیل بیشتر خواهد آمد. درنهایت نیز یک رخداد توفان گردوخاک وسیع انتخاب و شرایط همدیدی و سنجش‌ازدوری آن بررسی شد.



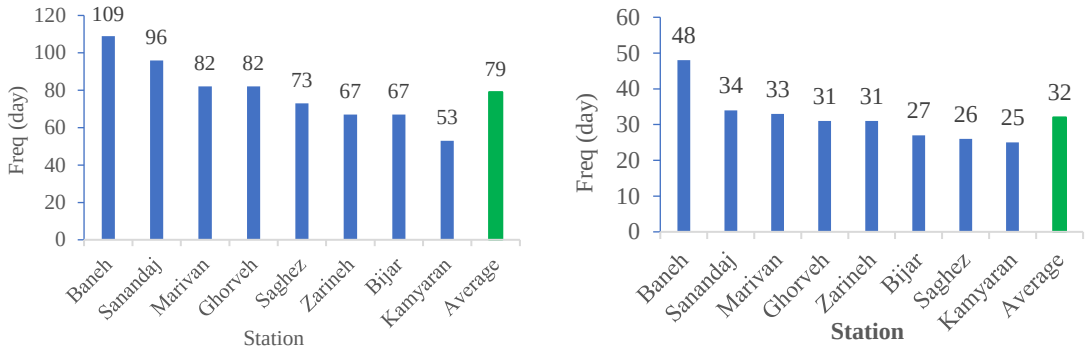
شکل ۳- درخت خوشه‌بندی و الگوهای مولد گردوخاک در استان کردستان بر اساس روزهای گردوخاک منتخب

Fig. 3. Clustering and generative patterns of dust storms in Kurdistan Province based on selected dust storm days

نتایج و بحث

نتایج حاصل از توزیع میانگین سالانه روزهای همراه با گردوخاک در ایستگاه‌های موردمطالعه در طول دوره آماری موردبررسی (۲۰۲۲-۱۹۹۲) نشان می‌دهد که بیشترین تعداد روزهای همراه با گردوخاک مربوط به ایستگاه بانه در غرب استان با متوسط ۴۸ روز در سال و کمترین تعداد نیز مربوط به ایستگاه کامیاران در جنوب استان با متوسط ۲۵ روز در سال است. بر این اساس متوسط

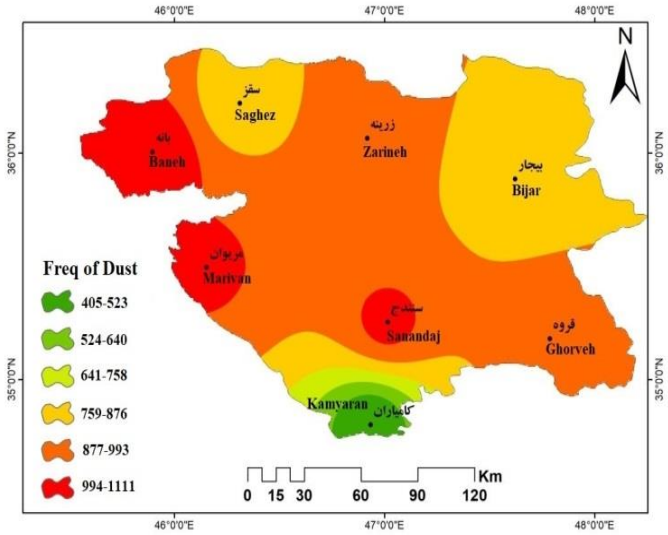
تعداد روزهای همراه با گردوخاک در استان کردستان برابر با ۳۲ روز در سال در طول دوره آماری مورد بررسی است. بیشترین فراوانی رخداد پدیده گردوخاک در سال در طول دوره آماری موردبررسی نیز مربوط به ایستگاه بانه با ۱۰۹ روز و سپس ایستگاه سنندج با ۹۶ روز در سال است که در سال ۲۰۰۹ میلادی (۱۳۸۸ شمسی) رخ داده است (شکل ۴).



شکل ۴- متوسط تعداد روزهای همراه با گردوخاک (سمت راست) و بیشینه رخداد پدیده گردوخاک در سال برحسب روز (سمت چپ) در ایستگاه‌های موردمطالعه در طول دوره آماری موردبررسی (۱۹۹۲-۲۰۲۲)

Fig. 4. Average number of dusty days (right) and maximum occurrence of dust event per year (left) at the study stations during the statistical period (1992-2022)

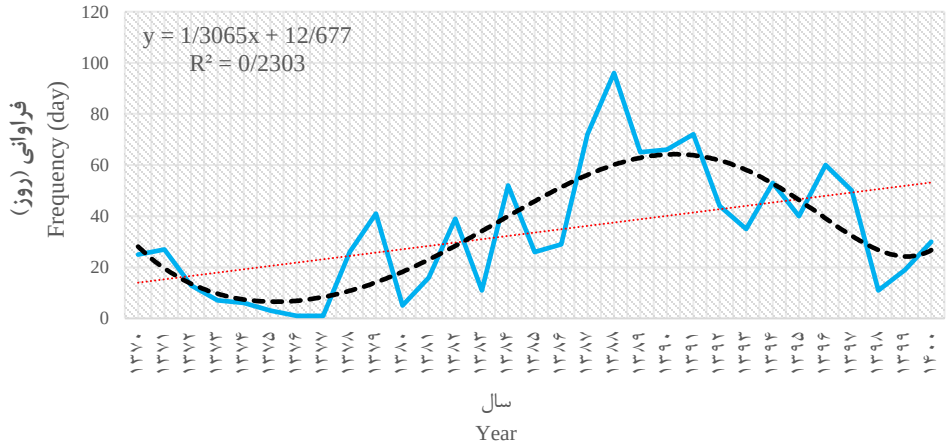
پراکنش مکانی فراوانی روزهای همراه با گردوخاک در طول دوره آماری مورد مطالعه (۱۹۹۲-۲۰۲۲) نیز نشان می‌دهد که ایستگاه‌های واقع در نواحی غربی و مرکزی استان نسبت به نواحی شرقی استان و ایستگاه‌های واقع در نواحی شمالی نسبت به نواحی جنوبی استان از روزهای همراه با گردوخاک بیشتری برخوردارند بر اساس نتایج ایستگاه بانه در غرب استان با ۱۱۱۱ روز، بیشترین و ایستگاه کامیاران در جنوب استان با ۴۰۵ روز کمترین فراوانی روزهای همراه با گردوخاک را در طول دوره آماری موردبررسی (۱۹۹۲-۲۰۲۲) داشته‌اند (شکل ۵). با توجه به موقعیت جغرافیایی استان کردستان در غرب کشور و هم‌جواری با کشور عراق و هم‌چنین ویژگی‌های محیطی و طبیعی استان، عوامل ارتفاع، عرض جغرافیایی، ساختار زمین‌شناسی و پوشش گیاهی منطقه می‌تواند در کاهش و افزایش رخداد روزهای همراه با گردوخاک نقش داشته باشد که با نتایج مطالعات گودرزی و همکاران (Goodarzi, Hoseini & Ahmadi , 2018) مبنی بر پراکنش روزهای همراه با گردوخاک در غرب کشور مطابقت دارد.



شکل ۵- پراکنش مکانی فراوانی روزهای همراه با گردوخاک در منطقه موردمطالعه در طول دوره آماری (۱۹۹۲-۲۰۲۲)

Fig. 5. Spatial distribution of the frequency of dusty days in the study area during the study period (1992-2022)

نتایج حاصل از بررسی روند تغییرات روزهای همراه با گردوخاک با استفاده از رگرسیون خطی در استان کردستان نشان داد که در تمام ایستگاه‌های مورد بررسی روند تغییرات افزایشی بوده است. برای نمونه روند خطی و پولی نومیال تغییرات روزهای همراه با گردوخاک در ایستگاه همدید سنندج در مرکز استان در طول دوره آماری موردبررسی آورده شده است. بر اساس نتایج متوسط روزهای همراه با گردوخاک در سنندج در طول دوره موردبررسی برابر با ۳۴ روز در سال بوده است. کمترین تعداد روزهای همراه با گردوخاک در سال ۱۳۷۷ (۱ روز در سال)، بوده است. همان‌طور که از نمودار شکل ۶ مشخص است تعداد روزهای همراه با گردوخاک از سال ۱۳۷۹ شروع به افزایش کرده است و در سال ۱۳۸۸ به بیشترین میزان رسیده (۹۶ روز در سال)، سپس روند کاهشی پیدا کرده است. بااین‌حال به‌طورکلی مشاهده می‌شود که بر اساس روند خطی میزان افزایش در طول دوره موردبررسی برابر با ۱/۳ روز در سال بوده است.



شکل ۶- روند تغییرات فراوانی پدیده گردوخاک در ایستگاه همدید سنندج در طول دوره آماری (۱۹۹۲-۲۰۲۲)

Fig. 6. Trend of dust phenomenon variation at the Sanandaj synoptic station during the study period (1992-2022)

الگوی اول (ناوه شرق مدیترانه)

بررسی نقشه ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۷ a) در گستره‌ای از عرض جغرافیایی صفر تا ۶۰ درجه شمالی و صفر تا ۷۰ درجه شرقی نشان می‌دهد که در این الگو، استقرار یک ناوه در شرق دریای مدیترانه و غرب سوریه که محور آن از شمال ترکیه تا شبه‌جزیره عربستان امتداد یافته است زمینه ناپایداری و صعود هوا را در این ناحیه فراهم آورده است. منحنی ۵۷۰۰ متر این ناوه با دامنه نسبتاً عمیق‌تری بر روی منطقه موردمطالعه و گسترش زبانه‌های آن تا غرب کشور باعث انتقال گردوخاک بیابان‌های سوریه و عراق و شمال شبه‌جزیره عربستان می‌شود. در نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال این الگو (شکل ۷b)، استقرار یک مرکز کم ارتفاع با پربند ۱۴۵۰ متر بر روی شمال دریای مدیترانه باعث شکل‌گیری یک ناوه عمیق بر روی بخش بزرگی از عراق و سوریه و شمال شرق آفریقا و شبه‌جزیره عربستان شده و سبب انتقال هوای گرم همراه با گردوخاک از نواحی شمال شرقی آفریقا، عراق و سوریه به غرب و شمال غرب کشور شده است. بررسی نقشه همدیدی فشار سطح دریا در الگوی اول (شکل ۷c) نشان می‌دهد که یک سلول کم‌فشار بسته با هسته ۱۰۰۸ هکتوپاسکال بر روی استان کردستان در راستای شمال غربی- جنوب شرقی شکل گرفته است که زبانه‌های آن تا نواحی مرکزی و جنوبی کشور گسترش یافته است و باعث مکش هوا به نواحی تحت سیطره خود شده است. لازم به ذکر است که یک سلول کم‌فشار دیگر نیز با فشار مرکزی ۱۰۱۰ هکتوپاسکال بر روی عراق و شرق عربستان تا خلیج‌فارس و یک سلول پرفشار در شمال ترکیه با فشار مرکزی ۱۰۱۲ هکتوپاسکال مستقر است که می‌تواند باعث تغییرات شیب فشار و انتقال گردوخاک به غرب و جنوب غرب کشور نیز باشد. بررسی نقشه همدیدی بردار باد در این الگو نیز نشان می‌دهد که با توجه به جهت وزش بادهای غربی و جنوب غربی در منطقه (باد شَمَال) شرایط برای انتقال گردوخاک به غرب کشور و منطقه موردمطالعه مناسب است. سرعت باد در منطقه موردمطالعه نیز بین ۲ تا ۵ متر بر ثانیه است که باعث تداوم و ماندگاری گردوخاک در منطقه شده است (شکل ۷d).

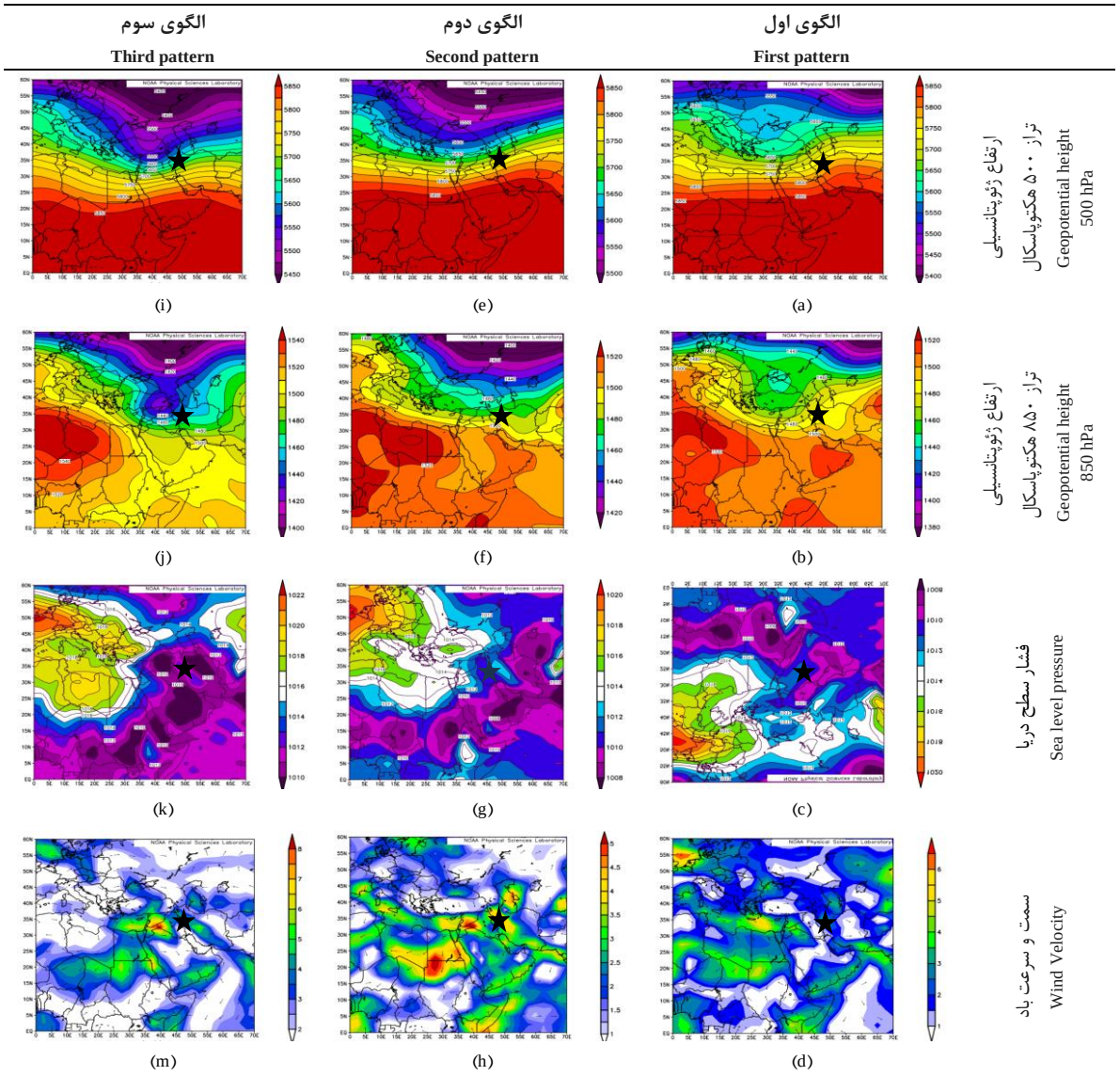
الگوی دوم (پشته عربستان)

نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در این الگو (شکل ۷e)، یک ناوه به محوریت شمال کشور ترکیه تا شمال شرق آفریقا را نشان می‌دهد. عمق این ناوه از ۵۰ درجه عرض شمالی تا ۲۵ درجه عرض شمالی است و طول‌موج آن از ۵ درجه طول شرقی تا ۵۰ درجه طول شرقی است که باعث شده منطقه موردمطالعه ما در جلو این ناوه قرار بگیرد و باعث گسیل گردوخاک از بیابان‌های عراق، سوریه و شمال آفریقا و شبه‌جزیره عربستان و انتقال آن به سمت غرب و جنوب غرب کشور و منطقه موردمطالعه شده است. در نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (شکل ۷f) نیز منطقه موردمطالعه در جلو یک ناوه که بر روی کشور عراق و سوریه شکل گرفته است قرار گرفته است که باعث انتقال گردوخاک بیابان‌های این مناطق و ریزش آن بر روی منطقه موردمطالعه شده است. با توجه به الگوهای همدیدی سطح دریا یک کم‌فشار از نواحی جنوب غربی ایران به سمت مرزهای غربی کشور تا جنوب شرقی ترکیه کشیده شده و هم‌زمان با آن نفوذ یک پشته از غرب به روی اردن، شمال عربستان و غرب سوریه باعث شکل‌گیری شیو فشاری روی جنوب سوریه و غرب عراق شده که سبب افزایش تندی باد در این نواحی شده است (شکل ۷g). سپس تقویت جریان‌های غربی و فعال شدن چشمه‌های گردوخاک در جنوب سوریه و شمال غربی عراق سبب انتقال گردوخاک به داخل مرزهای کشور شده است. جهت باد با توجه به سامانه‌های مذکور نیز غربی و شمال غربی و با سرعت بین ۳ تا ۵ متر بر ثانیه است که شرایط برای ماندگاری گردوخاک در آسمان منطقه موردمطالعه را فراهم می‌آورد (شکل ۷h).

الگوی سوم (کم ارتفاع شمال عراق)

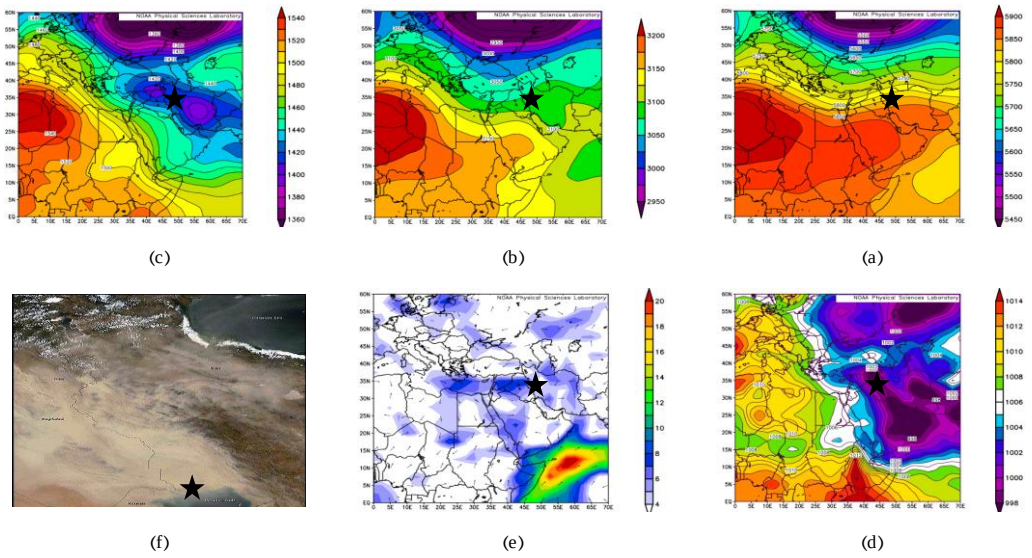
در نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال الگوی سوم (شکل i۷)، یک ناوه عمیق با محوریت شمال شرق ترکیه تا شمال شرق آفریقا گسترده شده است. این شرایط باعث قرارگیری منطقه موردمطالعه در جلو فرود و هم‌گرایی در ترازهای زیرین و واگرایی در ترازهای فوقانی جو بر روی غرب کشور شده است که درنتیجه خیزش گردوخاک از روی بیابان‌های شمال شرق آفریقا، شبه‌جزیره عربستان و عراق و ورود آن به منطقه موردمطالعه را به‌دنبال دارد. در نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (شکل j۷) یک مرکز کم ارتفاع (سردچال) با منحنی هم‌ارتفاع ۱۴۲۰ متر بر روی شمال عراق و سوریه شکل گرفته است. این مرکز کم ارتفاع با قرارگیری بر روی بیابان‌های این مناطق و با جریان پادساعت‌گرد خود، باعث خیزش گردوخاک این مناطق و انتقال آن به نواحی غربی کشور شده است. در نقشه تراز سطح دریای این الگو (شکل k۷) یک مرکز کم‌فشار با فشار مرکزی ۱۰۱۰ هکتوپاسکال بر روی عراق و سوریه شکل گرفته است که با گردش پادساعت‌گرد خود باعث انتقال گردوخاک بیابان‌های این نواحی به غرب کشور می‌شود. همچنین در نقشه تراز دریای این الگو یک مرکز پرفشار نیز با منحنی بسته ۱۰۱۸ هکتوپاسکال بر روی دریای مدیترانه شکل گرفته است که سبب نفوذ پشته روی اردن و شمال عربستان شده و درنهایت باعث تغییرات شیب فشار به سمت مرکز کم‌فشار مستقر بر روی عراق شده است. نقشه بردار باد در سطح زمین نیز جهت غربی باد به سطح منطقه موردمطالعه و همچنین تشکیل هسته بیشینه سرعت با مقادیر بیش از ۸ متر بر ثانیه بر روی مناطق بیابانی عراق و سوریه را نشان می‌دهد (شکل m۷).

در ادامه توفان گردوخاک چهارم تا هفتم ژوئیه ۲۰۰۹ با توجه به گستردگی و شدت فراوان در دوره آماری موردبررسی مورد تحلیل همدیدی و ماهواره‌ای قرار گرفت. بررسی نقشه‌های همدیدی ترازهای ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل a۸) طی روزهای چهارم تا هفتم ژوئیه ۲۰۰۹ نشان داد که در روز اوج فعالیت این سامانه (۵ ژوئیه)، منطقه موردمطالعه در جلو یک فرود موج‌کوتاه که محور آن بر روی شمال شرق آفریقا و شرق مدیترانه است، قرار گرفته و منحنی ارتفاعی ۵۸۰۰ متر بر روی منطقه موردمطالعه کشیده است. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نیز منحنی‌های پرارتفاع ۳۰۷۵ متر کشیده شده بر روی منطقه موردبررسی، حاکمیت شرایط ناپایداری و قرارگیری در جلو فرود در سطح منطقه را نشان می‌دهد (شکل b۸)؛ بنابراین یک فرود موج‌کوتاه بر روی شرق مدیترانه و شمال شبه‌جزیره عربستان باعث قرارگیری منطقه موردمطالعه در جلو فرود و تقویت شرایط ناپایداری و چرخندزایی در سطح منطقه می‌شود. این شرایط سبب خیزش و انتقال گردوخاک از بیابان‌های عراق، سوریه و اردن که در مرکز فعالیت ناپایداری قرار گرفته‌اند، به سمت غرب و جنوب غرب ایران می‌شود. در بررسی نقشه همدیدی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (شکل c۸) یک مرکز کم‌ارتفاع روی شمال غرب عراق و شرق سوریه و همچنین نواحی مرکزی و شرقی کشور کاملاً مشهود است. یک سلول کم‌فشار با فشار مرکزی ۱۰۰۰ هکتوپاسکال نیز در نقشه فشار سطح دریا (شکل d۸) روی مناطق ذکرشده گسترش یافته است که با قرارگیری در جلو فرود موج‌کوتاه سطح بالا شرایط برای ناپایداری و گسیل گردوخاک فراهم شده که با توجه به جهت وزش بادهای غربی و جنوب غربی در منطقه (باد شَمَال) انتقال این گردوخاک به منطقه موردمطالعه رخ داده است (شکلe۸). سنجنده MODIS ماهواره آکوا، تصاویری از گسترش این توفان را به ثبت رسانده که نشان می‌دهد این موج گردوخاک نه‌تنها منطقه موردمطالعه بلکه بیشتر مناطق کشور حتی تهران را درنوردیده است (شکل f۸).



شکل ۷– نقشه همدید ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، فشار تراز دریا، سمت و سرعت باد برای الگوهای اول، دوم و سوم

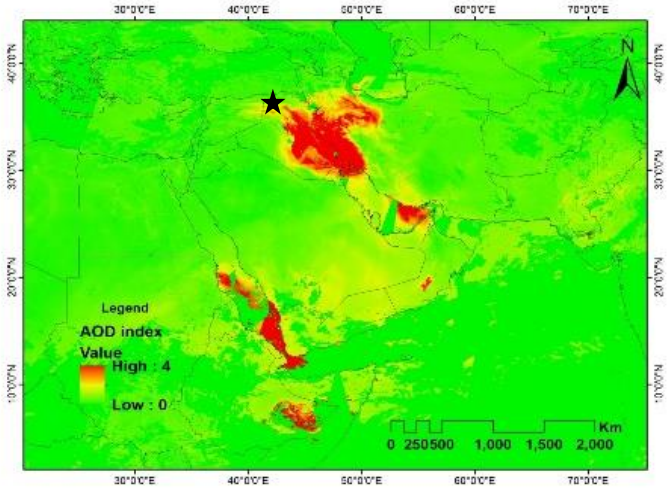
Fig. 7. Synoptic map of geopotential height at 500 hPa level, 850 hPa level, sea level pressure, wind velocity for the three- mode patterns



شکل ۸- نقشه همدید ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز **a**) ۵۰۰ هکتوپاسکال، **b**) ۷۰۰ هکتوپاسکال، **c**) ۸۵۰ هکتوپاسکال، **d**) فشار سطح دریا، **e**) سمت و سرعت باد در ۵ ژوئیه ۲۰۰۹. **f**) تصویر سنجنده MODIS از گسترش گردوخاک در روز ۷ ژوئیه ۲۰۰۹

Fig. 8. Synoptic map of geopotential height at a) 500 hPa, b) 700 hPa, c) 850 hPa, d) sea level pressure, e) wind velocity on July 5, 2009. f) MODIS image of dust development on July 7, 2009

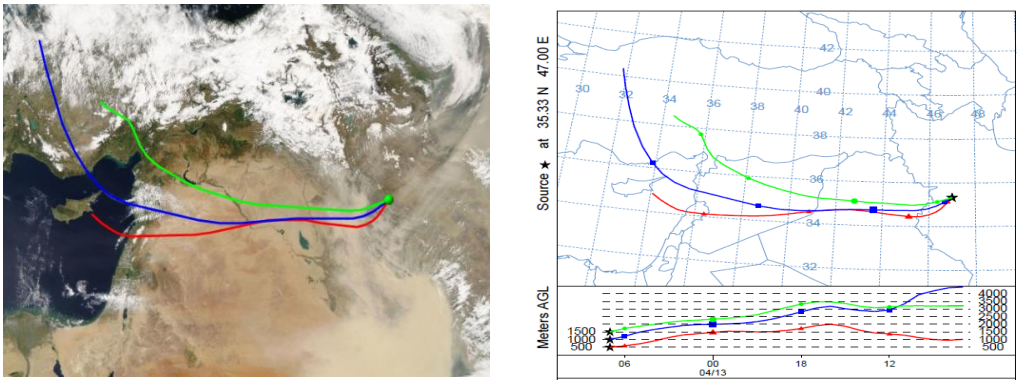
نتیجه اجرای ترکیب الگوریتم Deep Blue و Dark Target بر روی توفان گردوخاک ۵ ژوئیه ۲۰۰۹ نشان داد که این الگوریتم‌ها به‌خوبی توانسته‌اند با اندازه‌گیری عمق نوری، مناطق آلوده به گردوخاک را شناسایی کند. بر اساس نتایج بیشترین مقادیر AOD در استان کردستان مربوط به نواحی غربی و کمترین مقادیر مربوط به بخش‌های شمالی شرقی استان است در این توفان همان‌طور که مشاهده می‌شود تمام استان تحت تأثیر گردوخاک بوده است و تا نواحی مرکزی کشور نیز گسترش یافته است. درمجموع بیشترین مقادیر شاخص AOD در این رخداد مربوط به نیمه شرقی کشور عراق و منطقه مورد مطالعه پژوهش در غرب کشور است (شکل ۹).



شکل ۹- عمق نوری ذرات معلق (AOD) بر اساس ترکیب دو الگوریتم Deep blue و Dark target در توفان ۵ ژوئیه ۲۰۰۹

Fig. 9. AOD based on the combination of Deep blue and Dark target algorithms in the dust storm of July 5, 2009

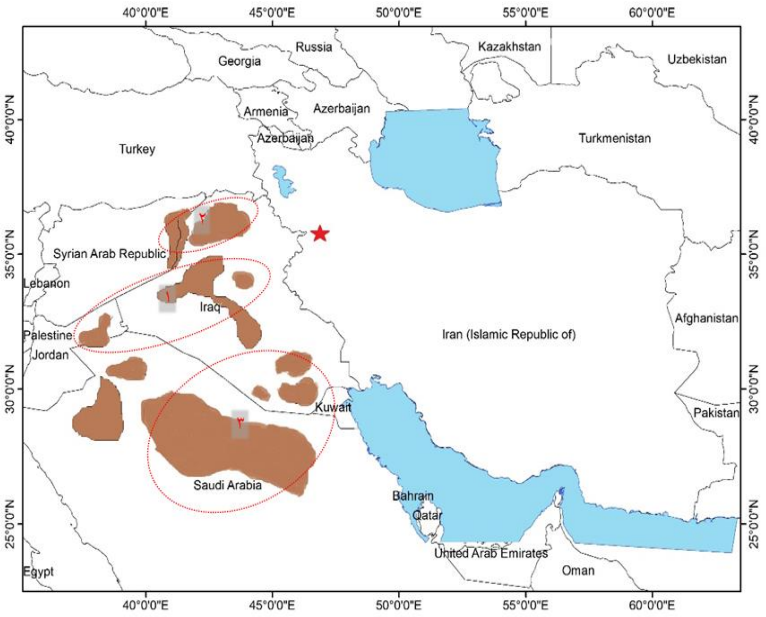
بررسی نتایج مربوط به منشاء گردوخاک ثبت‌شده در ایستگاه هواشناسی سنندج واقع در مرکز استان کردستان در توفان گردوخاک ۵ ژوئیه ۲۰۰۹، بیابان‌های کشورهای عراق، سوریه، اردن، عربستان و منطقه بین‌النهرین را به‌عنوان چشمه تولید گردوخاک معرفی می‌نماید (شکل ۱۰).



شکل ۱۰–نقشه‌های رهگیری مسیر باد با صورت پسگرد در توفان گردوخاک ۵ ژوئیه ۲۰۰۹

Fig. 10. Wind tracking maps with a backward trajectory in the dust storm of July 5, 2009

آشکارسازی گردوخاک بر روی تصاویر ماهواره‌ای همراه با رهگیری مسیر باد در مدل HYSPLIT نشان داد که پدیده گردوخاک در استان کردستان از ۳ چشمه اصلی منشاء می‌گیرد: ۱) اولین مرکز که شدیدترین گردوخاک‌ها نیز طی دوره موردمطالعه مربوط به آن است رسوبات کف رودخانه‌ها و هورهای خشک‌شده در نواحی مرکزی عراق و همچنین بیابان‌های اردن است و بیشترین رخداد این چشمه در فصل بهار است. ۲) شمال عراق و شرق سوریه چشمه دیگری است که بیشتر در فصول تابستان و بهار منبع گردوخاک به منطقه موردمطالعه است. بررسی تصاویر نشان می‌دهد که این چشمه در مقایسه با چشمه جنوب عراق و مناطق مرکزی و شمال شرقی عربستان نقش کمتری در گردوخاک وارده به منطقه موردمطالعه دارد؛ با این‌وجود یکی از مراکز مهم فعالیت گردوخاک برای منطقه موردمطالعه محسوب می‌شود. ۳) مناطق جنوبی عراق و شمال شرقی عربستان چشمه دیگری است که بیشترین رخداد گردوخاک ناشی از این چشمه، در دوره گرم سال است. هرچند در دوره سرد سال با فراوانی و شدت کمتر نیز این چشمه می‌تواند منطقه موردمطالعه را تحت تأثیر قرار دهد. نقشه کلی چشمه‌های بالقوه تولید گردوخاک در منطقه موردمطالعه در شکل ۱۱ ارائه شده است. بر این اساس بیشتر گردوخاک وارده به استان کردستان از کشورهای همسایه (عراق، سوریه، اردن و عربستان) منشاء می‌گیرد.



شکل ۱۱- نقشه توزیع چشمه‌های بالقوه تولید گردوخاک در منطقه موردمطالعه

Fig. 11. Distribution map of potential dust sources in the study area

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به واکاوی همدیدی و ماهواره‌ای روزهای همراه با گردوخاک در استان کردستان از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ پرداخته شده است. نتایج حاصل از بررسی وضعیت رخداد و مجموع روزهای همراه با گردوخاک نشان داد که شرایط جغرافیایی منطقه از طریق ساختار ناهمواری‌های منطقه و همچنین دور شدن از منشأ گردوخاک باعث شده تا پراکنش زمانی و مکانی رخداد روزهای همراه با گردوخاک یکسان نباشد و از غرب به شرق منطقه موردمطالعه کاهش رخ دهد. توزیع زمانی گردوخاک نشان داد که در استان کردستان فصل بهار با ۴۰ درصد و تابستان با ۲۷ درصد بیشترین روزهای همراه با گردوخاک را دارند، هرچند این پدیده با شدت کمتر تقریباً در تمام سال در منطقه موردمطالعه مشاهده می‌شود. نتایج حاصل با مطالعات محمدپور و همکاران (Mohammadpour et al., 2024) مبنی بر آشکارسازی فرین‌های فصلی گردوخاک در کردستان مطابقت دارد. پراکنش مکانی روزهای همراه با گردوخاک در طول دوره آماری موردمطالعه نیز نشان داد که ایستگاه بانه در غرب استان با ۱۱۱۱ روز، بالاترین و ایستگاه کامیاران در جنوب استان با ۴۰۵ روز کمترین فراوانی روزهای همراه با گردوخاک را در طول دوره آماری موردبررسی تجربه کرده‌اند. درمجموع ایستگاه‌های واقع در نواحی غربی و مرکزی استان نسبت به نواحی شرقی استان و ایستگاه‌های واقع در نواحی شمالی نسبت به نواحی جنوبی استان از روزهای همراه با گردوخاک بیشتری برخوردارند. بر اساس بررسی‌های و مطالعات قبلی صورت گرفته ازجمله گودرزی و همکاران (Goodarzi et al., 2018)، صلاحی و همکاران (Salahi et al., 2019)، رستمی و حسینی (Rostami & Hosseini, 2018) و لشکری و محمدی (Lashkari & Mohammadi, 2022) عواملی از قبیل ارتفاع، عرض جغرافیایی، ساختار زمین‌شناسی و پوشش گیاهی منطقه در پراکنش و کاهش و افزایش رخداد روزهای همراه با گردوخاک در یک منطقه نقش مؤثری ایفا می‌نمایند. بررسی نقشه‌های همدیدی سطوح بالا و سطح زمین نشان داد که سه الگوی مشخص برای رخداد گردوخاک در منطقه موردمطالعه قابل‌شناسایی است. بر اساس نتایج در بیشتر موارد استقرار یک سامانه کم‌فشار بر روی عراق و سوریه و تقویت شرایط ناپایداری در سطح بیابان‌های این مناطق و همچنین قرارگیری منطقه موردمطالعه در جلو ناوه عمیق، زمینه مناسب برای انتقال گردوخاک به

جو منطقه را فراهم می‌آورد و با نزدیک شدن هر چه بیشتر محور ناوه در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال به نواحی غربی کشور، شدت و غلظت گردوخاک افزایش بیشتری می‌یابد. همچنین با توجه به جهت وزش بادهای غربی و جنوب غربی در منطقه (باد شَمَال) شرایط برای انتقال گردوخاک به غرب کشور و منطقه موردمطالعه فراهم است. نتایج حاصل با مطالعات محمدپور و همکاران (Mohammadpour, Rashki, Sciortino, Kaskaoutis & Boloorani, 2022) در شناسایی و خوشه‌بندی رژیم‌های گردوخاک در جنوب غربی آسیا و قوامی و همکاران (Qhavami et al., 2014) در شناسایی الگوهای جوی منجر به گردوخاک در سنندج مطابقت دارد.

AOD و ترکیب دو الگوریتم Deep Blue و Dark Target بر روی توفان گردوخاک منتخب نیز نشان داد که بیشترین و کمترین میزان AOD به ترتیب مربوط به نواحی غربی و شمال شرقی استان کردستان است. نتایج حاصل با مطالعات محمدپور و همکاران (Mohammadpour, Saligheh, Darvishi Bloorani & Raziei, 2020) در شبیه‌سازی AOD در غرب کشور مطابقت دارد. آشکار-سازی گردوخاک بر روی تصاویر ماهواره‌ای همراه با رهگیری مسیر باد در مدل HYSPLIT نیز نشان داد که پدیده گردوخاک در استان کردستان از رسوبات کف رودخانه‌ها و هورهای خشک‌شده در نواحی مرکزی عراق، بیابان‌های اردن، نواحی شمال عراق و شرق سوریه و همچنین مناطق جنوبی عراق و شمال شرقی عربستان منشأ می‌گیرد. نتایج حاصل با مطالعات محمدپور و همکاران (Mohammadpour, Sciortino, Saligheh, Rezaiei & Bloorani, 2021) مبنی بر پراکنش زمانی و مکانی گرد و غبارهای جوی در ایران و همچنین مطالعه دیگر محمدپور و همکاران (Mohammadpour et al., 2022) مبنی بر شناسایی اقلیم‌شناسی چشمه‌های گردوخاک، AOD و خوشه‌بندی الگوهای گردوخاک در جنوب غربی آسیا و دریای عرب مطابقت دارد. گردوخاک همچون نواحی جنوب غربی کشور تقریباً به یک پدیده آشنا در آسمان غرب کشور نیز تبدیل شده است، بنابراین می‌توان با مدیریت بهتر زمینه سازگاری با این پدیده را فراهم نمود و مدیریت بحران قبل و حین بحران توسط سازمان‌های مدیریتی کشور مانند هلال‌احمر، محیط‌زیست، وزارت بهداشت و مدیریت بحران کشور برای مقابله با این پدیده ضروری است و قرار دادن این پدیده در لیست مخاطرات طبیعی مخرب در سازمان‌های ذی‌ربط می‌تواند زمینه سازگاری بهتر و کاهش اثرات مخرب این پدیده در آینده برای منطقه غرب و بیشتر کشور باشد.

سپاسگزاری

از همکاران محترم اداره کل هواشناسی استان کردستان و پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو که ما را در انجام این تحقیق یاری نموده‌اند، صمیمانه تشکر می‌کنیم.

References

Al-Khalidi, J., Bakr, D., & Abdullah, A. (2021). Synoptic Analysis of Dust Storm in Iraq. *EnvironmentAsia, 14*(1), 13-22. http://dx.doi.org/10.14456/ea.2021.2

Anuforom, A. (2007). Spatial distribution and temporal variability of Harmatan dust haze in sub-sahel west Africa. *Atmospheric Environment, 41*, 43-47. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.08.003

Ardalan, P. M., & Rahimzadegan, M. (2015). Identification of atmospheric dust on MODIS sensor images using NDDI index (case study: Sanandaj city). Paper presented at the Proceedings of the 2rd National Congress in Environmental Pollution and the Sustainable Development, Sanandaj. [In Persian] https://civilica.com/doc/365078

Bidokhti, A. A. A., Gharaylou, M., Pegahfar, N., Sabetghadam, S., & Rezazadeh, M. (2016). Characteristics of extreme dust events observed over two urban areas in Iran. *Journal of Earth System Science*, *125*, 431-442. https://doi.org/10.1007/s12040-016-0668-z

Cao, H., Jian, L., Guizhou, W., Guang, Y., & Lei, L. (2015). Identification of sand and dust storm source areas in Iran. *Journal of Arid Land, 7*(5), 567–578. https://doi.org/10.1007/s40333-015-0127-8

Choubin, B., Sajedi Hosseini, F., Rahmati, O., Mehdizadeh Youshanloei, M., & Jalali, M. (2022). Temporal and Spatial Variations of Dust Days in Western Azarbaijan Province, Determination of the Influencing Factors and Source of Events. *Desert Management*, *10*(2), 71-86. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jdmal.2022.550729.1378

Dia, A. C. (2005). Eolian contribution to soils on Mount Cameroon: isotopic and trace element records. *Chem Geol*, *226*, 232–252. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.09.022

Draxler, R., Stunder, B., Rolph, G., Stein, A., & Taylor, A. (2009). *HYSPLIT4 user's guide*. Air Resources Laboratory Silver Spring, Maryland, Version 4.9.

Ellis Jr, W. G., & Merrill, J. T. (1995). Trajectories for Saharan dust transported to Barbados using Stokes's law to describe gravitational settling. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *34*(7), 1716-1726. https://doi.org/10.1175/1520-0450-34.7.1716

Esfandyari darabad, F., Hosseini, S. A., & Mohammadpour, K. (2013). Synoptic statistical analysis of dust storms in Sanandaj city. Paper presented at the Proceedings of the 5th International Congress of the Islamic World Geographers, Tabriz. [In Persian] https://civilica.com/doc/196486

Eslami, A., Atafar, Z., Pirsahab, M., & Asadi, F. (2014). Trends of particulate matter (PM10) concentration and related Air Quality Index (AQI) during 2005-2012 in Kermanshah, Iran. *Journal of Health in the Field*, *2*(1), 19-28. [In Persian] https://doi.org/10.22037/jhf.v2i1.5633

Francis, D. B. K., Flamant, C., Chaboureau, J. P., Banks, J., Cuesta, J., Brindley, H., & Oolman, L. (2017). Dust emission and transport over Iraq associated with the summer Shamal winds. *Aeolian Research*, *24*, 15-31. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.11.001

Ginoux, P. A., Prospero, J. M., Gill, T. E., Hsu, C., & Zhao, M. (2012). Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Reviews of Geophysics, 50*(3), 1-36. https://doi.org/10.1029/2012RG000388

Goodarzi, M., Hoseini, A., & Ahmadi, H. (2018). Assessing Temporal and Spatial Distribution of Dust Storm in the south and south west of Iran. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, *11*(39), 1-10. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089554.1396.11.39.9.7

Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2006). *Desert Dust in the Global System*. Springer Science & Business Media.

Hejazizadeh, Z., Khosravi, A., Hosseini, S. A., Rahimi, A., & Karbalaee doree, A. R. (2021). Potential analysis of Kavir & Desert Region and Makran Coasts in order to obtain eEnergy from the sun using fuzzy logic and AHP. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences, 21*(63), 1-18. [In Persian] http://dx.doi.org/10.52547/jgs.21.63.1

Hosseini, S. M., Khoramabadi, F., & Tahani Yazdly, M. (2024). Analysis of Spatio-Temporal Changes of Dust Hazard in Kurdistan Province. *Environmental Researches, 14*(28), 181-197. [In Persian] https://www.iraneiap.ir/article_191709.html?

Hsu, N. C., Tsay, S. C., King, M. D., & Herman, J. R. (2006). Deep blue retrievals of Asian aerosol properties during ACE–Asia. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *44*, 3180–3195. https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.879540

Jin, Q., Wei, J., Pu, B., Yang, Z. L., & Parajuli, S. P. (2018). High summertime aerosol loadings over the Arabian Sea and their transport pathways. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *123*(18), 10-568. https://doi.org/10.1029/2018JD028588

Khodakarami, A., Hooshyar, M., Javid, A., & Hosseini, S. A. (2022). Finding the Potential of Underground Water Resources of Saghez City using Fuzzy Hierarchical Analysis Process (FAHP) in GIS. *Journal of Geography and Regional Development*, *20*(4), 173-133. [In Persian] https://doi.org/10.22067/jgrd.2023.77871.1180

Lashkari, H., & Mohammadi, Z. (2022). Comparison and analysis of the temporal and spatial distribution of dust storms with visibility of fewer than 200 meters in western and southwestern Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, *9*(1), 129-150. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24237892.1401.9.1.8.4

Li, X., Ge, L., Dong, Y., & Chang, H. C. (2010). Estimating the greatest dust storm in eastern Australia with MODIS satellite images. In *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* . Honolulu, Hawaii, USA. http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2010.5649212

Meshkizadeh, P., Orak, N., & Morshedi, J. (2016). Study of the spatial-temporal distribution of aerosol optical depth (AOD) in Khuzestan Province using remote sensing (RS) technique. *Geography and Environmental Studies*, *5*(17), 69-78. [In Persian] https://sanad.iau.ir/en/Article/978737

Middleton, N., Tozer, P., & Tozer, B. (2019). Sand and dust storms: underrated natural hazards. *Disasters*, *43*(2), 390-409. https://doi.org/10.1111/disa.12320

Mohammadpour, K., Rashki, A., Sciortino, M., Kaskaoutis, D. G., & Boloorani, A. D. (2022). A statistical approach for identification of dust-AOD hotspots climatology and clustering of dust regimes over Southwest Asia and the Arabian Sea. *Atmospheric Pollution Research*, *13*(4), 101395. https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101395

Mohammadpour, K., Saligheh, M., Darvishi Bloorani, A., & Raziei, T. (2020). Analysis and Comparing Satellite Products and Simulated of AOD in West Iran (2000-2018). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, *7*(1), 15-32. [In Persian] http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.7.1.3

Mohammadpour, K., Saligheh, M., Raziei, T., & Darvishi Bloorani, A. (2024). Spatiotemporal Detection of Dust Seasonal Extremes in Kurdistan Province from MACC and MODIS. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, *24*(72), 1-24. [In Persian] http://dx.doi.org/10.52547/jgs.24.72.1

Mohammadpour, K., Sciortino, M., Saligheh, M., Raziei, T., & Boloorani. A. D. (2021). Spatiotemporal regionalization of atmospheric dust based on multivariate analysis of MACC model over Iran. *Atmospheric Research*, *249*, 105322. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105322

Qhavami, S., Kaboodvandpour, S., Mohammadi, B., & Amanollahi, J. (2014). Analysis of synoptic patterns affecting the occurrence of dust storms in Kurdistan province. *Journal of Climate Research*, *5*(19), 67-80. [In Persian] https://clima.irimo.ir/article_15696.html

Qu, J. J., Hao, X., Kafatos, M., & Wang, L. (2006). Asian dust storm monitoring combining Terra and Aqua MODIS SRB measurements. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, *3*(4), 484-486. https://doi.org/10.1109/LGRS.2006.877752

Refahi, H. Gh. (2004). *Wind Erosion and Its Control*. Tehran: University of Tehran Press. [In Persian] https://press.ut.ac.ir/book_1602.html

Reyers, M., Hamidi, M., & Shao, Y. (2019). Synoptic analysis and simulation of an unusual dust event over the Atacama Desert. *Atmospheric Science Letters*, *20*(6), e899. https://doi.org/10.1002/asl.899

Rezaee Banafsheh, M., Dharifi, L., & Pirkhazraian, S. L. (2012). Estimating Dust Volume Using Satellite Images (Case Study: Kurdistan Province). *Quarterly Journal of Physical Geography, 5*(18), 13-22. [In Persian] https://faculty.tabrizu.ac.ir/mrbanafsheh/fa/articlesInPublications/download/1115

Rezazadeh, M., Irannejad, P., & Shao, Y. J. A. R. (2013). Climatology of the Middle East dust events. *Aeolian Research*, *10*, 103-109. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.04.001

Rostami, D., & Hosseini, S. A. (2018). Analysis and Tracking Dust Phenomenon in South and Southeast of Iran by using HYSPLIT Model and the Principles of Remote Sensing. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards, 5*(3), 103-119. [In Persian] http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.5.3.103

Salahi, B., Nohegar, A., & Behrouzi, M. (2019). Tracking of dust at levels of atmospheric in Sanandaj Using HYSPLIT model in order to manage environmental hazards. *Geography (Regional Planning), 9*(34), 83-95. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286462.1398.9.2.6.2

Sehatkashani, S., VazifeDoust, M., Kamali, G., & Bidokhti, A. A. (2015). Synoptic Analysis and Pressure Patterns of Dust events in the West and South West of Iran. *Journal of Climate Research, 1*(21), 9-20. [In Persian] https://clima.irimo.ir/article_40440_en.html

Shamshiri, S. (2012). *Dust Zoning Using MODIS Satellite Data Case Study: Kermanshah Province*. Master's thesis. Isfahan University of Technology. [In Persian]

Soltani, M. J., Motamedvaziri, B., Noroozi, A. A., Ahmadi, H., & Mosaffaei, J. (2021). Identifying and prioritizing the factors affecting the creation of dust in Hendijan City and providing management solutions by DPSIR framework. *Watershed Engineering and Management, 13*(2), 269-282. [In Persian] https://doi.org/10.22092/ijwmse.2021.352406.1848

USEPA. (2001). *EPA/Water Quality, Environmental Matters*. Environmental Protection Agency, United States.

Vol.14, No.2, Summer 2025, p.68-87 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2025.88181.1488 OPEN ACCESS

Detection of Climate Change Impacts on Precipitation and Temperature Parameters in the Kabul Drainage Basin, Afghanistan, Using the LARS-WG08 Model

Abdul Aziz Qazizada[1], Kamal Omidvar*[2], Gholam Ali Mozaffari[3], Ahmad Mazidi[4]

[1] PhD Student in Climatology, Faculty of Geography, Yazd University, Yazd, Iran
[2 &3] Professor in Climatology, Faculty of Geography, Yazd University, Yazd, Iran
[4] Associate Professor in Climatology, Faculty of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 27 May 2024

Revised: 31 December 2024

Accepted: 16 January 2025

Available Online: 16 January 2025

Keywords:

Climate Change

Climatic Trend Analysis

Temperature and Precipitation Variability

Mann-Kendall Test

LARS-WG Weather Generator

Kabul Basin

ABSTRACT

One of the most contentious issues among contemporary climatologists is the existence of climate change and alteration in the trends of atmospheric parameters. The primary aim of this research was to examine the trends in precipitation and temperature changes under climate change conditions, and to predict future temperature and precipitation in the Kabul Drainage Basin, Afghanistan. To evaluate the impact of climate change on precipitation and temperature parameters, detection, trend analysis, prediction, and model accuracy analyses were conducted. In this process, methods such as anomalies, the non-parametric Mann-Kendall test, Theil-Sen's slope, the LARS-WG model (sixth report), and statistical indices such as the correlation coefficient, coefficient of determination (r, R^2), RMSE, and NRMSE were used. The research findings indicate that in the Kabul Drainage Basin, the trends in these parameters are positive, with increasing annual average precipitation and increasing annual average temperature. The rainy season has gradually shifted from winter to summer. Specifically, the annual precipitation between 1979 and 2020 increased by approximately 0.30% or 0.93 mm, while the temperature increased significantly by about 8% (1.2°C). Predictions suggest that the trend of increasing temperature and decreasing precipitation will continue from the baseline period (1991–2021) into the 2021–2050 period. Across all scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 the minimum temperature is projected to increase by 0.4°C, 0.5°C, and 0.6°C, respectively, and the maximum temperature by 0.6°C, 0.7°C, and 0.8°C compared to the baseline period. Annual precipitation is also expected to decrease by approximately 11% compared to the baseline period. Therefore, the impacts of climate change, including increased temperatures and altered precipitation patterns, are likely to exacerbate the risk of floods and related hazards in the future. The study of precipitation and temperature parameters under climate change is crucial. Accordingly, adaptation strategies for climate change and the enhancement of resilience are recommended.

*Corresponding author: Dr. Kamal Omidvar E-mail address: komidvar@yazd.ac.ir

How to cite this article: Qazizada, A. A., Omidvar, K., Mozaffari, Gh. A., & Mazidi, A. (2025). Detection of Climate Change Impacts on Precipitation and Temperature Parameters in the Kabul Drainage Basin, Afghanistan, Using the LARS-WG08 Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(2), 68-87. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.88181.1488

©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, as one of the most critical challenges of the present century, has had widespread effects on the environment, water resources, agriculture, and human livelihoods worldwide. It remains one of the most controversial topics in climatology. Most climatologists believe that changes in temperature or precipitation cannot simply be interpreted as long-term or short-term climatic fluctuations. Studies indicate that climate change is a global threat that disrupts the sustainability of various components of the Earth's system. Therefore, understanding current conditions and making climate projections are essential for identifying vulnerabilities and developing strategies to adapt to climate change.

Long-standing internal conflicts, diverse climates, complex topography, and a lack of meteorological stations have hindered extensive research in this field. To date, no comprehensive scientific studies have been conducted on precipitation and temperature trends in the Kabul Basin. While numerous global studies exist, research efforts in Afghanistan have been limited. Among the few studies in Afghanistan are those by Babar et al. (2016), Aliyar, Dhungana, and Shrestha (2022), Broomand (2015), Mestarshed (2013, 2014), Nasrati (2018), Sharafat (2020), and Salehi (2022). These studies indicate a declining trend in precipitation, particularly during spring and winter, and a rising trend in temperature across Afghanistan.

The Kabul River Basin, due to its unique geographical location and climatic conditions, has been significantly impacted by climate change, experiencing notable alterations in precipitation and temperature parameters. This region not only holds critical importance for water supply and agriculture for its inhabitants, but also warrants closer examination due to the frequent occurrence of floods and droughts. A detailed assessment of precipitation and temperature trends in the basin is essential.

The primary objective of this study is to investigate the impacts of climate change on precipitation and temperature variables and to forecast these parameters in the Kabul River Basin. This research employs various methods, including anomaly detection, the non-parametric Mann-Kendall test, Sen's slope estimator, the LARS-WG model, and correlation coefficients, to analyze precipitation and temperature trends and address the existing research gap.

Material and Methods

This study utilized ground-based data from 28 meteorological stations over the period 1979–2020, as well as atmospheric data from NASA's MERRA-2 dataset. In 2021, missing precipitation and temperature data for the years 1979–2020 were completed by Japanese researchers using the gap-filling method. Due to the lack of daily ground-based precipitation and temperature data, daily precipitation and temperature records for 1991–2020 were downloaded from NASA's MERRA-2 platform. Missing and anomalous data were completed using statistical methods such as moving averages, and outliers were identified and removed using statistical tests like the Shapiro-Wilk test.

Analytical methods, including anomalies, the non-parametric Mann-Kendall test, Sen's slope estimator, and statistical indices such as the correlation coefficient (r), coefficient of determination (R^2), RMSE, and NRMSE, were applied in the analysis. Trend analysis was conducted using the anomaly method (Equation 1) and the Mann-Kendall test (Equation 2). Using outputs from the Sixth Assessment Report of the IPCC and the LARS-WG8 model (HadGEM3-GC31-LL-CMIP6), climatic elements were projected for the 2021–2050 period. The validation of the results was conducted using statistical measures, including r, R^2, RMSE, and NRMSE (Equations 4, 5, and 6). Data analysis was performed using ArcGIS, Excel, and SPSS software.

(1) $$Z = \frac{Yi - \mu}{\sigma}$$

(2) $$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

(3) $$U_{tT} = \sum_{i=1}^{t} \sum_{j=t+1}^{T} sgn\,(X_i - X_j) \quad K_T max|U_{tT}|$$

(4) $$RMSE = \frac{\sum n\sqrt{(xi-\mu)2}}{n}$$

(5) $$\text{MSE}= \frac{1}{n}\ \sum(xi - \mu)2$$

(6) $$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}}$$

Additionally, using validation indices such as the correlation coefficient (r), root mean square error (RMSE), and normalized root mean square error (NRMSE), along with observational precipitation and temperature data from five meteorological stations in the Kabul River Basin for the period 1991–2020, the outputs of the LARS-WG8 model were validated. The results confirm the satisfactory performance of the model in generating downscaled precipitation and temperature data.

Results and Discussion

The Mann-Kendall test, recommended by the World Meteorological Organization, was used in this study to analyze the annual rainfall trend. This statistical method is a standard approach for evaluating temporal trends in hydrological data. The results, presented in Table 2, indicate that during the period 1979–2020, the mean annual rainfall was 310 mm, with minimum and maximum values of 116 mm and 358 mm, respectively. Using a 95% confidence level ($\alpha = 0.05$), the calculated Z-statistic for the Mann-Kendall test was 1.96, confirming a statistically significant increasing trend. An annual rainfall increase of 0.30% was observed in the Kabul River Basin.

Similarly, the trends in annual minimum, maximum, and mean temperatures were analyzed, as detailed in Table 3. The results reveal significant increases in all three temperature parameters. Specifically, the Mann-Kendall test showed that the annual minimum temperature exhibited the most pronounced trend, with a Z-value of 5.25, followed by significant increases in the annual mean and maximum temperatures. Analysis of the data in Table 2 confirms that all temperature types have risen considerably over the period 1979–2020.

Figure 5, based on Table 2, illustrates the temporal trend of annual mean temperature in the Kabul River Basin, highlighting a clear and substantial increase over the study period. These findings, combined with the lack of effective adaptation measures to address climate change, suggest that the observed trends are likely to continue. This ongoing temperature rise is expected to accelerate glacier melting, leading to a higher frequency of floods in the basin in the coming years.

Conclusion

The results of this study indicate that the annual precipitation in the Kabul Basin during the period 1979–2020 experienced an insignificant increase of approximately 0.3%, equivalent to 0.93 mm, while temperature exhibited a significant rise of nearly 8%, corresponding to an increase of 1.2°C. Projections suggest that the upward trend in temperature and the downward trend in precipitation will persist during 2021–2050 compared to the baseline period (1991–2021). Under all Shared Socioeconomic Pathway (SSP) scenarios—SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5—minimum temperatures are projected to increase by 0.4°C, 0.5°C, and 0.6°C, respectively, and maximum temperatures by 0.6°C, 0.7°C, and 0.8°C, respectively, compared to the baseline period. Additionally, annual precipitation is expected to decrease by approximately 11% relative to the baseline. The forecasts further suggest changes in the region's precipitation regime, specifically a reduction in the proportion of precipitation occurring during colder months compared to other months. Consequently, the ratio of solid precipitation (snow) to liquid precipitation (rain) is projected to decline in the coming years.

جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۸۷-۶۸ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2025.88181.1488 دسترسی آزاد

آشکارسازی پیامدهای تغییر اقلیم بر پارامترهای بارش و دما در حوضه آبریز کابل افغانستان با استفاده از مدل لارس

عبدالعزیز قاضی زاده[۱]، کمال امیدوار*[۲]، غلامعلی مظفری[۳]، احمد مزیدی[۴]

[۱، ۲، ۳ و ۴] دانشکده جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۷

کلمات کلیدی:

تغییر اقلیم

تحلیل روند اقلیمی

تغییرپذیری دما و بارندگی

آزمون من-کندال

تولیدکننده آب و هوایی LARS-WG –

حوضه کابل

چکیده

ازجمله مسائلی که در بین اقلیم‌شناسان امروزه مورد اختلاف قرار دارد، وجود تغییرات اقلیمی یا تغییر روند در متغیرهای جوی است. هدف اصلی در این تحقیق آشکارسازی پیامدهای تغییر اقلیم بر متغیرهای بارش و دما، و پیش‌بینی دما و بارش در حوضه‌ی آبریز کابل می‌باشد. برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای بارش و دما، آشکارسازی، روندیابی، پیش‌بینی و تحلیل دقت مدل‌ها انجام گرفت. در این فرایند از روش‌های آنومالی، آزمون نا پارامتریک من-کندال، شیب سنس، مدل لارس (گزارش ششم) و ضریب همبستگی، ضریب تعیین r, R^2, RMSE, NRMSE استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در حوضه‌ی آبریز کابل، میانگین بارش سالانه در سطح اطمینان ۰/۰۵ از روند افزایشی برخوردار بوده و میانگین سالانه‌ی دما در سطح اطمینان ۰/۰۵ روند افزایشی داشته و فصل بارندگی از زمستان به تابستان تغییر تدریجی نموده است. به‌عبارت دیگر، مقدار سالانه‌ی بارش در بازه‌ی زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۰ تقریباً ۰/۳۰ درصد یا معادل ۰/۹۳ میلی‌متر افزایش غیر محسوس و دما به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است که تقریباً ۸ درصد یا معادل ۱/۲ درجه سانتی‌گراد افزایش را نشان می‌دهد. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که روند افزایش دما و کاهش بارش نسبت به دوره‌ی پایه (۲۰۲۱-۱۹۹۱) در بازه‌ی زمانی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ ادامه خواهد داشت. در تمامی سناریوهای SSP1-2.6 ، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 دمای کمینه به ترتیب به میزان ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ درجه سلسیوس و دمای بیشینه به میزان ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه، افزایش و بارش سالانه نیز حدود۱۱درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد داشت؛ بنابراین بر اثر تغییرات اقلیمی افزایش دما و تغییر الگوی بارش، احتمال وقوع سیلاب و خطرات مرتبط با آن در آینده جدی‌تر خواهد شد. از این جهت مطالعات متغیرهای بارش و دما تحت شرایط تغییر اقلیم بسیار ضروری بوده و راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم و افزایش تاب‌آوری پیشنهاد می‌شود.

*نویسنده مسئول: دکتر کمال امیدوار Email: komidvar@yazd.ac.ir

مقدمه

تغییرات اقلیمی به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم قرن حاضر، تأثیرات گسترده‌ای بر محیط‌زیست، منابع آب، کشاورزی و معیشت انسان‌ها در سراسر جهان داشته است. تغییر اقلیم یکی از بحث‌برانگیزترین مباحث اقلیمی است، بیشتر اقلیم‌شناسان معتقدند که تغییرات گرمایی یا بارشی را نمی‌توان به عنوان نوسانات طولانی یا کوتاه‌مدت آب‌وهوا تفسیر کرد (Omidvar & Khosravi, 2010). تغییرات در ویژگی‌های بارش و دما باعث تغییر در دسترسی به آب می‌شود و پیامدهایی برای انسان و زیست‌کره دارد. مطالعات نشان می‌دهند که تغییر اقلیم یک تهدید جهانی است که پایداری بخش‌های مختلف سامانه‌ی زمین را مختل کرده است (Parsa, Zarin, Mofidi, & Dadashi Rudbari, 2024). افزایش دما و نوسانات بارش نیز می‌تواند بر دسترسی به آب و تولید محصول در آینده تأثیر بگذارد (Rahimi & Zarei, 2019; Douville et al., 2021; IPCC, 2021; Ellison et al., 2017; Swain, Singh, Touma, & Diffenbaugh, 2020). بنابراین، آگاهی از شرایط کنونی و پیش‌بینی‌های اقلیمی برای شناسایی آسیب‌پذیری‌ها و توسعه‌ی راهبردهای سازگاری با تغییرات اقلیمی بسیار ضروری است. جنگ‌های داخلی طولانی‌مدت، اقلیم متنوع، توپوگرافی پیچیده و کمبود ایستگاه‌های هواشناسی از عواملی هستند که مانع انجام تحقیقات گسترده در این زمینه شده‌اند. تاکنون تحقیقات علمی درباره‌ی روند تغییرات بارش و دما در حوضه‌ی آبریز کابل، صورت نگرفته است؛ اما در این تحقیق تلاش کرده‌ام از روش‌های متنوعی ازجمله روش‌های آنومالی، آزمون نا پارامتری من-کندال، شیب سنس[1]، مدل لارس[2] و ضرایب همبستگی برای بررسی روند تغییرات بارش و دما پرداخته شود تا گوشه‌ای از خلأ تحقیقاتی پر گردد.

افزایش دما، بارش‌های شدید، تغییر در الگوهای بارش تحت شرایط تغییر اقلیم در مناطق مختلف جهان و ایران در پژوهش‌های پوکهرل و همکاران (Pokhrel et al., 2021)، فریچ و همکاران (Frich et al., 2002)، کریستنسن و همکاران (Christensen, Wood, Voisin, & Lettenmaier, 2004)، بنیستون و همکاران (Beniston et al., 2007)، اکستروم و همکاران (Ekström, Fowler, Kilsby, & Jones, 2003)، فولر و کیلسبای (Fowler & Kilsby, 2007)، فری و همکاران (Frei, Schöll, Fukutome, Schmidli, & Vidale, 2006)، میلهوت و همکاران (Mailhot, Duchesne, Caya & Talbot, 2007)، استیل دون و همکاران (Steele-Dunne et al., 2008)، سویگنت و همکاران (Souvignet, Gaese, Ribbe, Kretschmer & Oyarzun, 2008) و آذری و همکاران (Azari, Moradi, Saghafian & Faramarzi, 2016) گزارش شده است. با وجود پژوهش‌های زیادی که در سطح جهانی انجام شده، پژوهش‌های معدودی در افغانستان صورت گرفته است. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به تحقیقات بابر و همکاران (Babar et al., 2016)، علیار و همکاران (Aliyar, Dhungana & Shrestha, 2022)، برومند (Broomand, 2015)، مسترشد (Mestarshed, 2014)، مسترشد (Mestarshed, 2013)، نصرتی (Nasrati, 2018)، شرافت (Sharafat, 2020) و صالحی (Salehi, 2022) در افغانستان استناد کرد. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که بارش در افغانستان، به‌ویژه در فصول بهار و زمستان، روند کاهشی و دما روند افزایشی را طی نموده است.

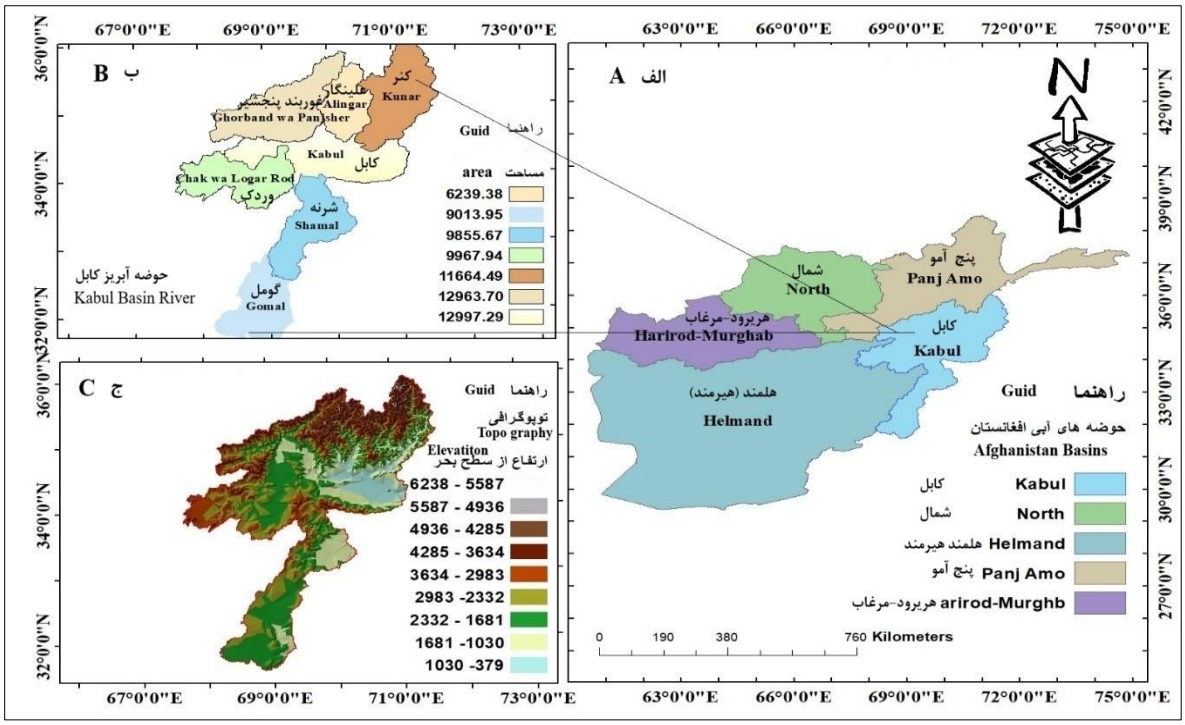
حوضه‌ی آبریز کابل به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی خاص خود، از تغییرات اقلیمی به‌شدت متأثر شده و شاهد تغییرات قابل‌توجهی در متغییر های بارش و دما بوده است. این منطقه نه‌تنها اهمیت بالایی ازنظر تأمین منابع آب و کشاورزی برای جمعیت ساکن در آن دارد، بلکه به دلیل وقوع مکرر سیلاب‌ها و خشک‌سالی‌ها، شایسته‌ی بررسی دقیق‌تری برای شناسایی روند تغییرات بارش و دما می‌باشد. به‌منظور بررسی روند تغییرات بارش و دما تحت تغییرات اقلیمی در مقیاس روزانه، ماهانه و سالانه در حوضه‌ی آبریز کابل از داده‌های زمینی ۲۸ ایستگاه هواشناسی در بازه‌ی زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۰ و داده‌های هوایی وبگاه ناسا (میرا ۲)[3]

1- Theil-Sen's Slope
2 -LARS-WG8 GCM CMIP6 HadGEM3-GC31-LL
3-The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

استفاده شده است. با بهره‌گیری از خروجی‌های گزارش ششم IPCC و مدل LARS-WG8- HadGEM3-GC31-LL -CMIP6، عناصر اقلیمی در دوره زمانی (۲۰۵۰-۲۰۲۱) پیش‌بینی‌شده است.

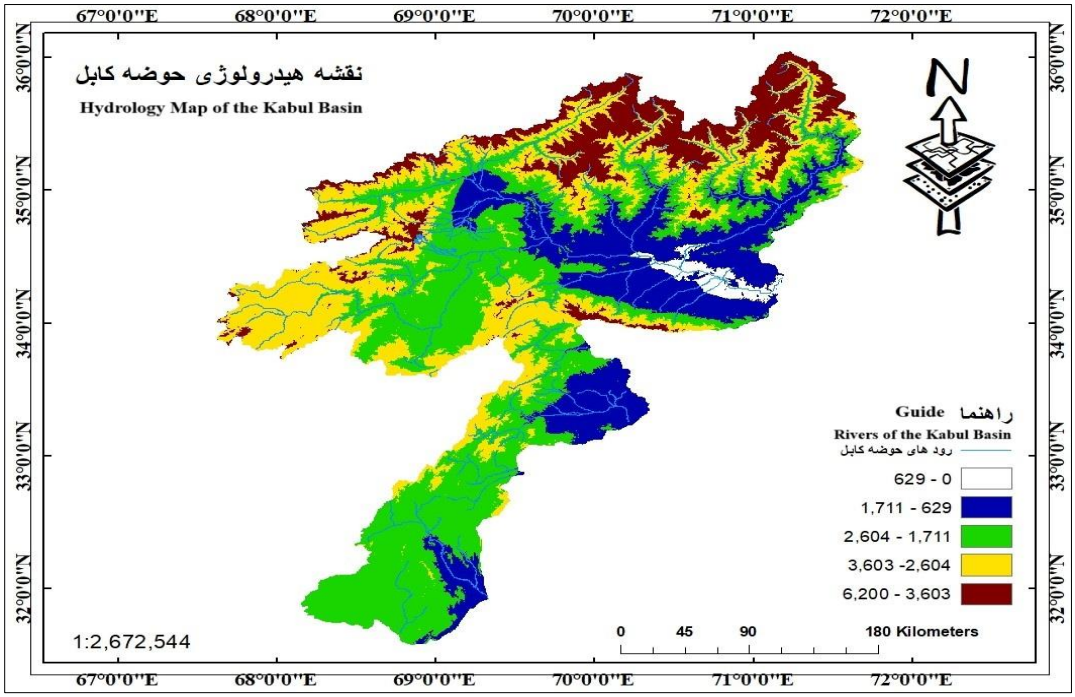
منطقه مورد مطالعه

حوضه‌ی کابل در شمال شرق افغانستان قرار دارد. این حوضه از طرف شمال به حوضه‌ی آمو، ازطرف شرق به کشور پاکستان و از جنوب‌غرب به حوضه‌ی آبریز هیرمند (هلمند) متصل می‌باشد. استان‌های کابل، لوگر، میدان‌وردگ، پنجشیر، پروان، کاپیسا، لغمان، ننگرهار، کنر، نورستان، خوست، پکتیا و پکتیکا را در برمی‌گیرد. شکل ۱ مساحت کل حوضه‌ی آبریز کابل تقریباً ۷۶۹۰۸ کیلومترمربع است. حدود ۵۵ درصد از اراضی این حوضه ارتفاعات کوهستانی را تشکیل می‌دهد و بیش‌ترین مناطق آن در ارتفاعات بالاتر از ۲۵۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد. ظرفیت منابع آبی قابل دست‌رسی این حوضه‌ی ۱۹۰ میلیارد مترمکعب است که از این مقدار، ۵/۲ میلیارد مترمکعب برای زراعت و سایر مقاصدمصرف می‌شود. رود کابل و شاخه‌های آن از دامنه‌های جنوبی هندوکش و کوه‌های مرکزی سرچشمه گرفته و پس از طی مسافتی به رود سند می‌ریزد (شکل ۲)، (Hasanzai, 2022).



شکل ۱- الف) حوضه‌های آبی افغانستان، ب) منطقه مورد مطالعه ج) توپوگرافی

Fig .1. A Five River Basin of AF, B Study Area C Topogrphy



شکل ۲- نقشه هیدرولوژی حوضه کابل

Fig .2. Hydrology Map of the Kabul Basin

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی روند تغییرات بارش و دمای تحت شرایط تغییرات اقلیمی در سه مقیاس روزانه، ماهانه و سالانه، از داده‌های زمینی ۲۸ ایستگاه هواشناسی در بازه‌ی زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۰ و داده‌های هوایی وبگاه ناسا (میرا ۲) استفاده‌شده است. در سال ۲۰۲۱ ارقام گم‌شده‌ی بارش و دمای سال های ۱۹۷۹-۲۰۲۰ را جاپانی‌ها با استفاده از روش گپ فیلینگ[1] انجام دادند. به همین علت این دوره‌ی زمانی انتخاب و از وزارت انرژی و آب افغانستان دریافت گردیده و به دلیل عدم داده‌ی روزانه بارش و دما زمینی، داده‌های بارش و دمای روزانه‌ی سال‌های ۱۹۹۱- ۲۰۲۰ از وبگاه ناسا (میرا ۲) دانلود گردیده است. داده‌های گم‌شده و ناهنجاری‌ها با استفاده از روش‌های آماری نظیر میانگین‌گیری متحرک[2] تکمیل شده‌اند و داده‌های ناهنجار با استفاده از آزمون‌های آماری مانند آزمون شاپیرو-ویلک[3] شناسایی و حذف‌شده‌اند. در این فرایند از روش‌های آنومالی، آزمون نا پارامتریک من-کندال، شیب سنس، مدل لارس (گزارش ششم) و ضریب همبستگی، ضریب تعیین، r,R2,RMSE,NRMSE استفاده گردید. روندیابی به ترتیب و با استفاده از روش‌های آماری آنومالی رابطه (۱) آزمون نا پارامتری من-کندال رابطه (۲) انجام‌شده است. با بهره‌گیری از خروجی‌های گزارش ششم IPCC و مدل CMIP6 -LARS-WG8- HadGEM3-GC31-LL، عناصر اقلیمی در دوره‌ی زمانی (۲۰۵۰-۲۰۲۱) پیش‌بینی‌شده است. اعتبارسنجی نتایج توسط r ,R2 ,RMSE ,NRMSE رابطه (۴)، رابطه (۵) و رابطه (۶) سنجیده شده و در این پژوهش برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای ArcGIS, Excel و SPSS نیز کار گرفته‌ایم.

1- Gap-filling
2- Moving Average
3- Shapiro-Wilk Test

$$Z= \frac{Y i \ -\mu}{\sigma} \quad (۱)$$

$$Var(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (۲)$$

$$U_{tT}=\sum_{i=1}^{t}\sum_{j=t+1}^{T} sgn\,(X_i-X_j) \quad K_T max|U_{tT}| \quad (۳)$$

$$RMSE=\frac{\sum n\sqrt{(xi-\mu)2}}{n} \quad (۴)$$

$$\text{MSE}=\frac{1}{n}\ \sum(xi-\mu)2 \quad (۵)$$

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\ \sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \quad (۶)$$

با استفاده از شاخص‌های ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE) و داده‌های مشاهداتی دما و بارش پنج ایستگاه آب‌وهوا شناسی حوضه آبریز کابل در بازه زمانی (۲۰۲۰-۱۹۹۱) خروجی‌های منتج از مدل LARS-WG8 اعتبارسنجی شدند. نتایج کارایی قابل‌قبول مدل در ایجاد داده‌های ریزمقیاس نمایی شده بارش و دما را تأیید می‌کند (جدول ۱).

جدول ۱- اعتبار سنجی داده‌های برآوردی مدل LARS-WG8 GCM CMIP6 HadGEM3-GC31-LL

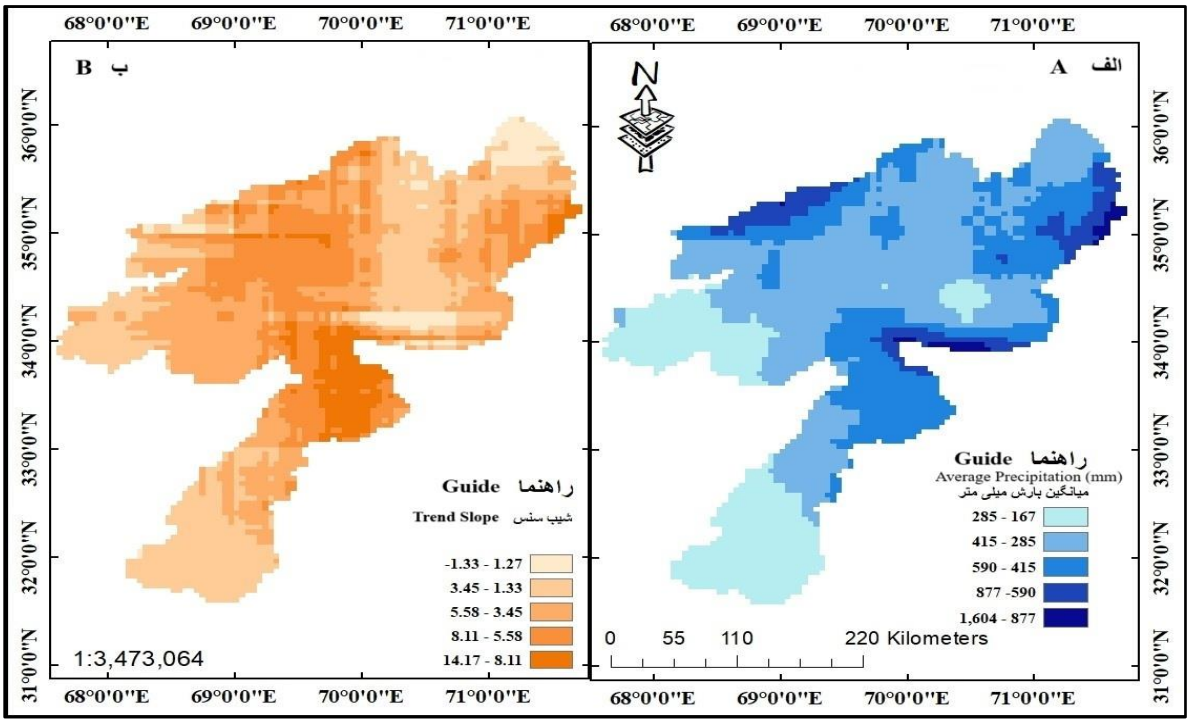
Table 1- Validation of Estimated Data from the LARS-WG8 Model Using GCM CMIP6 HadGEM3-GC31-LL

ایستگاه‌ها Stations	کابل میدان هوایی Kabul Airport	کنر Kunar	خاواک Khawak	قرغه Qargha	عمرز Omarz
R	0.93	0.95	0.98	0.98	0.95
R^2	0.87	0.90	0.96	0.97	0.89
RMSE	5.58	5.98	3.40	3.2	2.6
NRMSE	11%	11%	8 %	7 %	10 %

تحلیل نقشه بارش و نقشه شیب روند

نقشه بارش، توزیع مکانی میانگین بلندمدت بارندگی را در حوضه کابل نمایش می‌دهد. رنگ‌های مختلف در این نقشه از آبی روشن تا آبی تیره، مقادیر متفاوت بارندگی را نشان می‌دهد. مناطق با رنگ آبی روشن نشان‌دهنده کمترین میزان بارندگی متوسط سالانه (۱۶۶ تا ۲۸۴ میلی‌متر) این مناطق اغلب در ارتفاعات پایین قرار دارد، جایی که بارش به حداقل می‌رسد. مکان‌های با رنگ آبی کمی تیره‌تر نشان‌دهنده مناطقی با بارندگی متوسط سالانه هستند. رنگ آبی تیره‌ترین نشان‌دهنده مناطقی با بالاترین میانگین بارش سالانه (۸۷۶ تا ۱۶۰۳ میلی‌متر) است. این مناطق در ارتفاعات بالاتر از ۳۰۰۰ متر قرار دارند و عمدتاً تحت تأثیر جریان‌های سایبری زمستانی، جریان مونسون و بادهای مرطوب هند قرار می‌گیرند. این نواحی عمدتاً قسمت‌های شمال و شمال‌شرقی حوضه کابل را در بر می‌گیرند. در مقابل، بخش‌های جنوبی و جنوب‌غربی حوضه کابل کمترین میانگین بارش را نشان می‌دهند.

شکل۳- (الف) و شکل۳- (ب) نقشه شیب روند بارش است که با استفاده از شیب سنس در بازه زمانی ۱۹۹۱-۲۰۲۰ حوضه کابل ترسیم شده است. این نقشه به بررسی تغییرات بارش در نقاط مختلف حوضه طی این بازه زمانی می‌پردازد. رنگ‌های مختلف در نقشه شیب روند، میزان و جهت تغییرات بارش در طول زمان را نشان می‌دهد. رنگ‌های روشن‌تر، نشان‌دهنده شیب منفی (بین ۱.۳۳- تا ۱.۲۷- میلی‌متر) هستند که بیانگر کاهش بسیار کم بارش در طول زمان است. رنگ‌های نارنجی تیره‌تر نشان‌دهنده بیشترین شیب تغییرات بارش (بین ۸.۱۱ تا ۱۴.۱۷ میلی‌متر) در طول زمان هستند. این مناطق احتمالاً تغییرات شدید بارندگی را تجربه کرده‌اند، که می‌تواند ناشی از تغییرات در الگوهای اقلیمی منطقه‌ای یا جهانی باشد و اثرات جدی بر محیط‌زیست و جوامع محلی داشته است.



شکل ۳-الف) نقشه بارش و ب نقشه شیب روند حوضه کابل

Fig .3. A) Precipitation Map and B gradiant Trend Map of the Kabul Basin

نتایج و بحث

نتایج حاصل از روند تغییرات بارش و دما به ما کمک می‌کند تا در راستای حوادث احتمالی که در آینده ممکن است رخ دهد، تدابیر لازم و کافی را باید گرفت. در زیر، متغییرهای بارش و دما در بازه‌ی زمانی ماهانه و سالانه در حوضه‌ی آبریز کابل با استفاده از مدل‌های ذکرشده به ترتیب مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

تحلیل روند سالانه بارش

برای تحلیل روند سالانه بارندگی، از آزمون پیشنهادی سازمان جهانی هواشناسی(آزمون من-کندال) در این تحقیق استفاده شده است. این آزمون به‌عنوان یک روش آماری برای تحلیل روند زمانی بارندگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج تحلیل سالانه بارندگی در جدول۲ آورده شده است.

میانگین، کمترین و بیش‌ترین مقدار بارندگی سالانه در بازه زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۰ به ترتیب ۳۱۰ میلی‌متر، ۱۱۶ میلی‌متر و ۳۵۸ میلی‌متر است. سطح اطمینان برای تجزیه‌وتحلیل آزمون من-کندال ۹۵ درصد ($\alpha = 0.05$) انتخاب‌شده است. آماره Z محاسبه‌شده برای آزمون من-کندال برابر با ۱/۹۶ است، که نشان‌دهنده وجود یک‌روند افزایشی معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد می‌باشد. درنتیجه، یک‌روند افزایشی ۰/۳۰ درصد در بارندگی سالانه حوضه آبریز کابل مشاهده می‌شود.

جدول ۲- نتیجه روند سالانه بارش در حوضه آبریز کابل

Table 2- Results of Annual Precipitation Trends in the Kabul River Basin

حوضه Basin	α=0.05 (Z)	میانگین بارندگی سالانه (میلی متر) Annual Average Rainfall (mm)	بارندگی کمینه-بیشینه (میلی‌متر) Minimum-Maximum Rainfall (mm)	مدت ارقام و داده Period of Records and Data	نتیجه روند Trend Analysis Results	
کابل Kabul	1/96	310	116 358 2021-1991	2020-1979	0/30	↑

نمودار میانگین بارندگی، بر اساس داده‌های ۲۸ ایستگاه سنجش هواشناسی در بازه زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۰، تغییرات سالانه درازمدت بارندگی در حوضه آبریز کابل را نشان می‌دهد. شکل ۴ که براساس نتایج جدول ۲ برای تحلیل روند میانگین سالانه بارش در حوضه آبریز کابل تهیه‌شده است، خطوط نقطه‌چین سیاه و خط مستقیم نارنجی به ترتیب میانگین سالانه و روند خطی بارندگی را نمایش می‌دهند. این سری زمانی نشان می‌دهد که کمترین بارش ۱۱۶ میلی‌متر در سال ۲۰۰۱ و بیش‌ترین بارش ۳۵۸ میلی‌متر در سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۱۹ ثبت‌شده است. میانگین بلندمدت سالانه بارش نیز ۳۱۰ میلی‌متر بوده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان گفت که میزان بارندگی سالانه در حوضه آبریز کابل روند افزایشی غیر محسوس داشته است.



شکل ۴- میانگین سالانه درازمدت بارندگی در حوضه آبریز کابل از ۱۹۷۹- ۲۰۲۰

Fig .4. Long-Term Annual Average Precipitation in the Kabul River Basin (1979-2020)

تحلیل روند سالانه دما

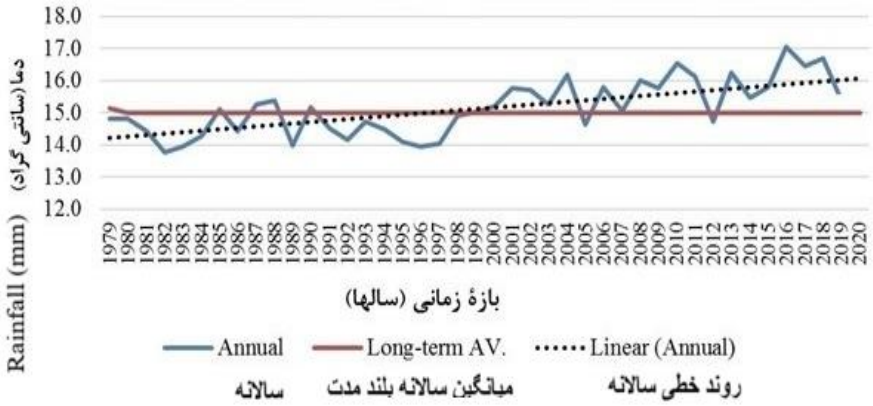
در این بخش، تحلیل روند سالانه دما در حوضه آبریز کابل انجام‌شده است. در این تحلیل، روند دمای کمینه، بیشینه و میانگین سالانه موردبررسی قرارگرفته، در جدول ۳ آورده شده. نتایج حاصل نشان می‌دهد که دمای کمینه سالانه، دمای میانگین سالانه و دمای بیشینه سالانه به‌طور قابل‌توجهی افزایش‌یافته است. نتایج کلی آزمون من-کندال برای این حوضه آبریز نشان می‌دهد که دمای سالانه به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای در حال افزایش است.

جدول ۳- نتیجه روند دمای سالانه (کمینه، بیشینه و میانگین) حوضه آبریز کابل

Table 3- Results of the Annual Temperature Trend (Minimum, Maximum, and Average) in the Kabul River Basin

دما سالانه(°C) **Annual Temperature (°C)**	مدت ارقام **Period of Records**	نتایج روند آزمون منکندال **Mann-Kendall Trend Test Results**	روند **Trend**
دما حداقل سالانه Annual Minimum Temperature	2020-1979	(↑) 5/25	افزایش قابل‌ملاحظه Significant Increase
دما حداکثر سالانه Annual Maximum Temperature		(↑) 4/47	افزایش قابل‌ملاحظه Significant Increase
دما میانگین سالانه Annual Average Temperature	2020-1979	(↑) 4/36	افزایش قابل‌ملاحظه Significant Increase

باتوجه‌به جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت که هر سه نوع دما (کمینه، بیشینه و میانگین) در بازه زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۰ به طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش پیداکرده است. این افزایش‌ها درواقع نشان‌دهنده پیامدهای منفی تغییرات اقلیمی در حوضه آبریز کابل می‌باشد. بیش‌ترین تغییر روند در دمای کمینه مشاهده می‌شود، که دارای رقم Z = ۵/۲۵ است و یک‌روند افزایشی را نشان می‌دهد. شکل۵ که بر اساس نتایج جدول ۲ برای تحلیل روند زمانی دمای میانگین سالانه در حوضه آبریز کابل ترتیب داده‌شده است، به‌وضوح مشخص است که دما در تمام بازه زمانی یک‌روند افزایش قابل‌ملاحظه را طی کرده است. با توجه به این یافته‌ها و عدم وجود راهکارهای مناسب برای سازگاری با تغییر اقلیم، احتمال دارد که این روند همچنان ادامه یابد و شاهد بیشتر شدن دما و در پی آن از اثر ذوب یخچال‌ها انتظار می‌رود که وقوع سیلاب‌ها در این حوضه در سال‌های آینده بیشتر شود.



شکل ۵- روند تغییرات میانگین دمای سالانه حوضه کابل

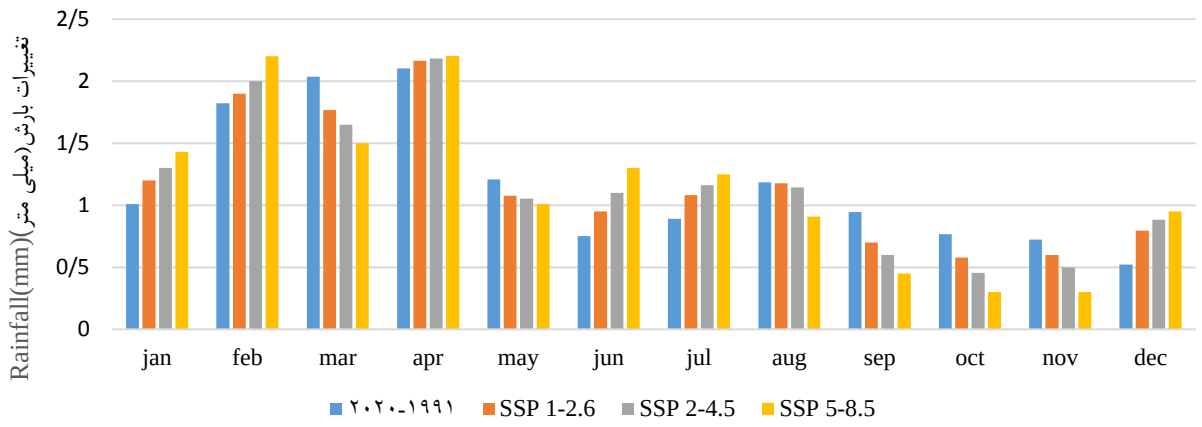
Fig .5. Trend of Annual Average Temperature Changes in the Kabul River Basin

پیش‌بینی پارامترهای بارش و دما

پیش‌بینی بارش، دمای کمینه و بیشینه در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۵۰، در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۲۰ با استفاده از مدل HADGEM3-GCM31-LL تحت سناریوهای SSP1-2.6 (خوش‌بینانه)، سناریو SSP2-4.5 (واقع‌نگر) SSP 5-8.5 (بدبینانه) استفاده‌شده است.

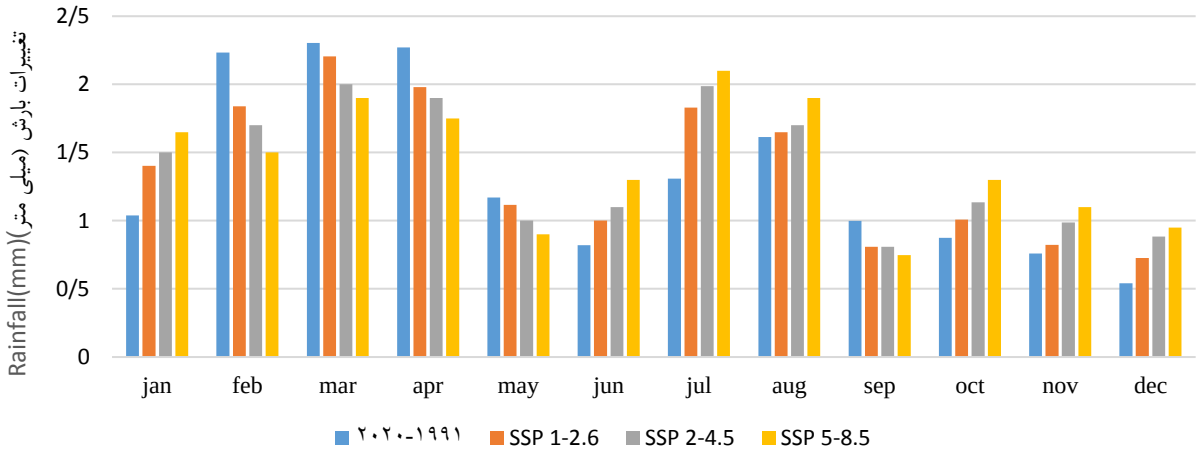
پیش‌بینی بارندگی ماهانه

میانگین بارش ماهیانه در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ برای هر سه سناریوSSP1-2.6 ، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در طول ماه‌های ژانویه، فوریه، ژوئن، جولای و دسامبر نشان می‌دهد که بارندگی نسبت به دوره پایه افزایش‌یافته است، و در ماه‌های مارس، می، آگوست، سپتامبر و اکتبر کاهش‌یافته است. در ایستگاه میدان هوایی کابل شکل ۶ میزان بارندگی در ماه‌های ژانویه، فوریه، ژوئن، جولای و دسامبر افزایش و در ماه‌های مارس، می، آگوست، سپتامبر، و اکتبر کاهش را نسبت به دوره پایه در هر سه سناریو نشان می‌دهد. ایستگاه کنر شکل ۷ بارش در ماه‌های ژانویه، جون، جولای آگوست، اکتبر، نوامبر و دسامبر افزایش و در ماهای فوریه مارس آوریل، می و سپتامبر کاهش نسبت به دوره پایه پیش‌بینی‌شده است. ایستگاه قرغه شکل ۸ میزان بارندگی در ماه‌های ژانویه، فوریه، آوریل، می، ژوئن، جولای، نوامبر و دسامبر افزایش و در ماه‌های مارس، آگوست، سپتامبر، و اکتبر کاهش را نسبت به دوره پایه در هر سه سناریو نشان می‌دهد. در ایستگاه خاواک شکل ۹ میزان بارندگی در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، سپتامبر، اکتبر و دسامبر کاهش و در سایر ماه‌ها افزایش بارندگی نسبت به دوره پایه در هر سه سناریو توسط مدل برآورده شده است. در ایستگاه عمرض شکل ۱۰ میزان بارندگی در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، اکتبر، نوامبر و دسامبر کاهش و در سایر ماه‌ها افزایش بارندگی نسبت به دوره پایه در هر سه سناریو توسط مدل برآورده شده است.



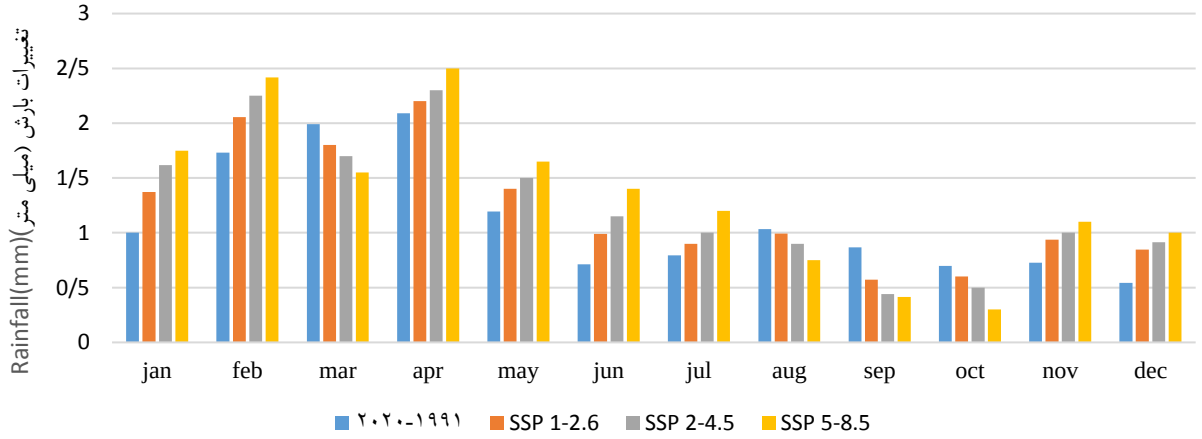
شکل ۶- میانگین بارش ماهانه پیش‌بینی‌شده در مقایسه با دوره پایه ایستگاه میدان هوایی کابل با استفاده از سناریوهای مدل HADGEM3-GCM31-LL

Fig .6. Comparison of Predicted Monthly Average Precipitation with the Baseline Period at Kabul Airport Station Using HADGEM3-GCM31-LL Model Scenarios



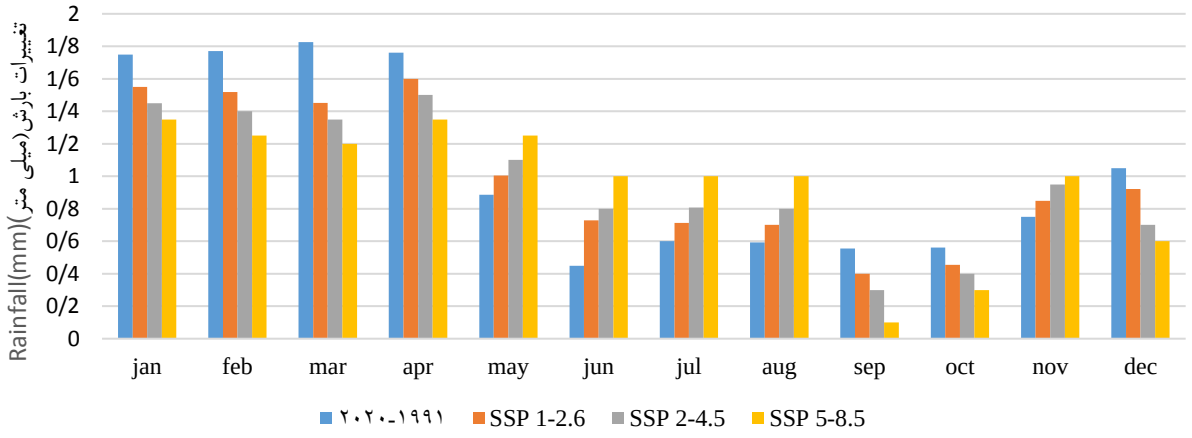
شکل ۷- میانگین بارش ماهانه پیش‌بینی‌شده در مقایسه با دوره پایه ایستگاه کنر با استفاده از سناریوهای مدل HADGEM3-GCM31-LL

Fig .7. Comparison of Predicted Monthly Average Precipitation with the Baseline Period at Kunar Station Using HADGEM3-GCM31-LL Model Scenarios



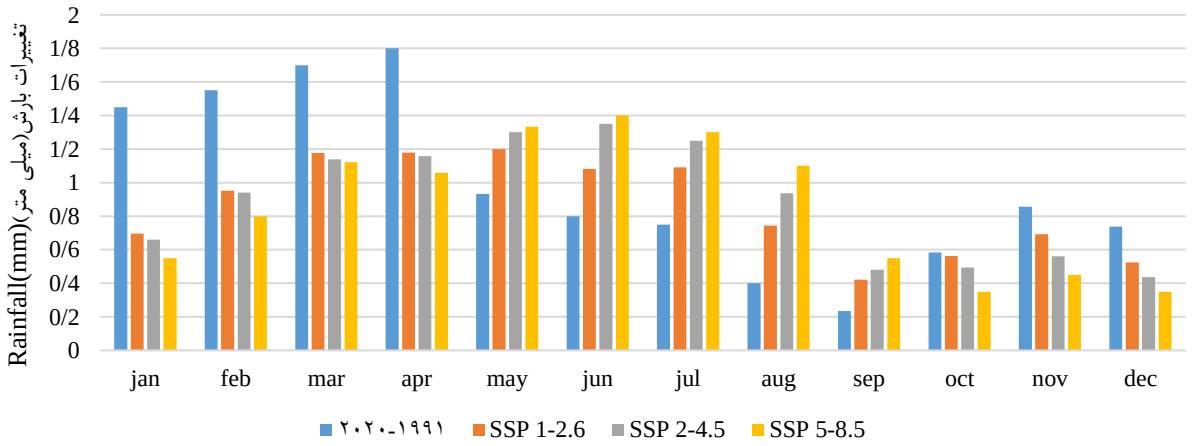
شکل ۸- میانگین بارش ماهانه پیش‌بینی‌شده در مقایسه با دوره پایه ایستگاه قرغه با استفاده از سناریوهای مدل HADGEM3-GCM31-LL

Fig .8. Comparison of Predicted Monthly Average Precipitation with the Baseline Period at Qargha Station Using HADGEM3-GCM31-LL Model Scenarios



شکل ۹- میانگین بارش ماهانه پیش‌بینی‌شده در مقایسه با دوره پایه ایستگاه خاواک با استفاده از سناریوهای مدل HADGEM3-GCM31-LL

Fig .9. Comparison of Predicted Monthly Mean Precipitation with the Baseline Period for Khawak Station Using HADGEM3-GCM31-LL Model Scenarios



شکل ۱۰- میانگین بارش ماهانه پیش‌بینی‌شده در مقایسه با دوره پایه ایستگاه عمرض با استفاده از سناریوهای مدل HADGEM3-GCM31-LL

Fig .10. Comparison of Predicted Monthly Mean Precipitation with the Baseline Period for Omarz Station Using HADGEM3-GCM31-LL Model Scenarios

در زیر جداول خروجی عملکرد مدل لارس و تغییرات میانگین بارش ماهانه ایستگاه میدان هوایی حوضه آبریز کابل آمده است. به جهت تعدد جداول، از ذکر جداول سایر ایستگاه ها خود داری گردیده است. نتایج حاصل خروجی عملکرد مدل لارس در سه سناریو در جدول ۴ و تغییرات میانگین بارش ماهانه در سه سناریو در جدول ۵ نشان می‌دهد که بارش در اغلب ماه‌ها روند افزایشی داشته و انتظار می‌رود که در ۳۰ سال آینده ۲۰۵۰-۲۰۲۱ در هر سه سناریو مقدار بارش ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست (فصل بهار و تابستان) روند افزایشی داشته و بقیه ماه روند کاهشی را طی می‌کند.

جدول ۴- خروجی عملکرد مدل LARS-WG8 بارش ایستگاه حوضه کابل

Table 4- Output of LARS-WG8 Model Performance for Precipitation at Kabul Basin Station

Dec	Nov	Oct	Sep	Aug	Jul	Jun	May	Apr	Mar	Feb	Jan	ایستگاه میدان هوایی کابل Kabul airport Station
16.22	21.69	23.93	28.49	36.94	28.16	21.59	37.45	65.38	60.95	51.31	30.84	بارش پایه ۱۹۹۱-۲۰۲۰ BaselinePrecipitation 1991-2020
15.30	20.10	20.11	27.97	36.24	33.46	27.46	47.19	55.38	58.19	43.95	29.57	بارش آتی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ ProjectedPrecipitation 2021-2050
0.98	0.76	0.73	0.93	0.92	0.39	0.43	0.21	0.40	0.46	0.33	0.84	p-value
0.92	1.59	3.82	0.52	0.70	-5.30	-5.87	-9.74	10.00	2.76	7.36	1.27	تفاوت بارش پایه بر بارش آتی Difference Between Baseline and ProjectedPrecipitation

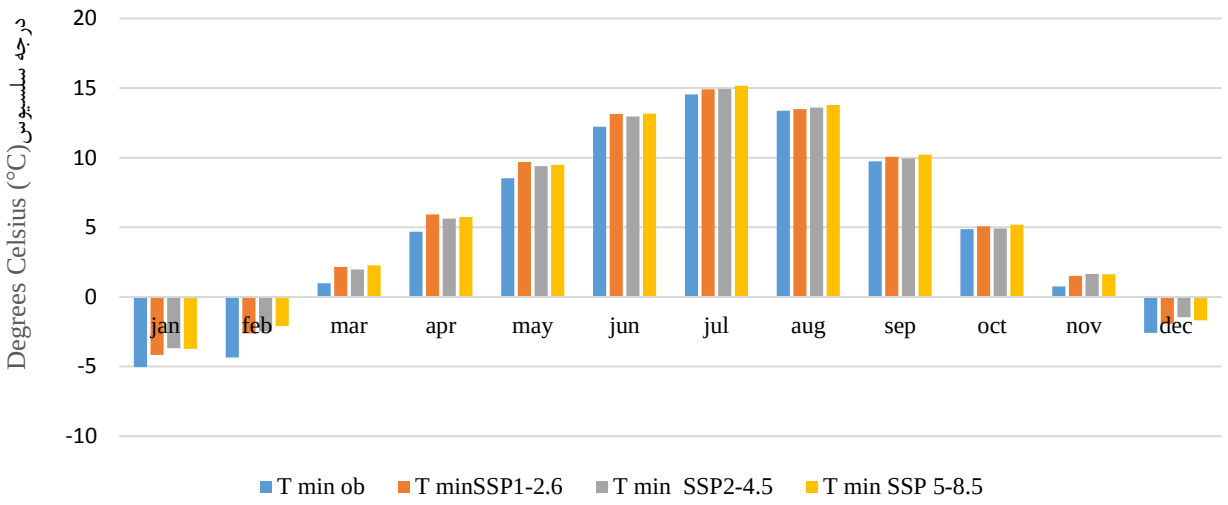
جدول ۵- میانگین بارش ایستگاه میدان هوایی کابل از ۱۹۹۱-۲۰۲۰ و بارش آتی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ در سه سناریو

Table 5- Average Precipitation of Kabul Airport Station from 1991-2020 and Projected Precipitation for 2021-2050 under Three Scenarios

Dec	Nov	Oct	Sep	Aug	Jul	Jun	May	Apr	Mar	Feb	Jan	ایستگاه میدان هوایی کابل Kabul airport Station
0.52	0.72	0.77	0.95	1.19	0.89	0.75	1.21	2.10	2.04	1.82	1.01	1991-2020
0.80	0.60	0.58	0.70	1.18	1.08	0.95	1.08	2.17	1.77	1.90	1.20	SSP 1-2.6
0.88	0.50	0.45	0.60	1.14	1.16	1.10	1.05	2.18	1.65	2.00	1.30	SSP 2-4.5
0.95	0.30	0.30	0.45	0.91	1.25	1.30	1.01	2.20	1.50	2.20	1.43	SSP 5-8.5

پیش‌بینی دمای کمینه

میانگین ماهیانه دمای کمینه ایستگاه میدان هوایی کابل در ماهای ژانویه، فوریه و دسامبر به ترتیب ۱/۶۵ ، ۲/۲۵، ۰/۹۲ نسبت به دوره پایه کاهش و در تمامی سناریوها SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه به ترتیب به میزان ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ درجه سلسیوس افزایش‌یافته است. در شکل ۱۱ نشان داده‌شده است.

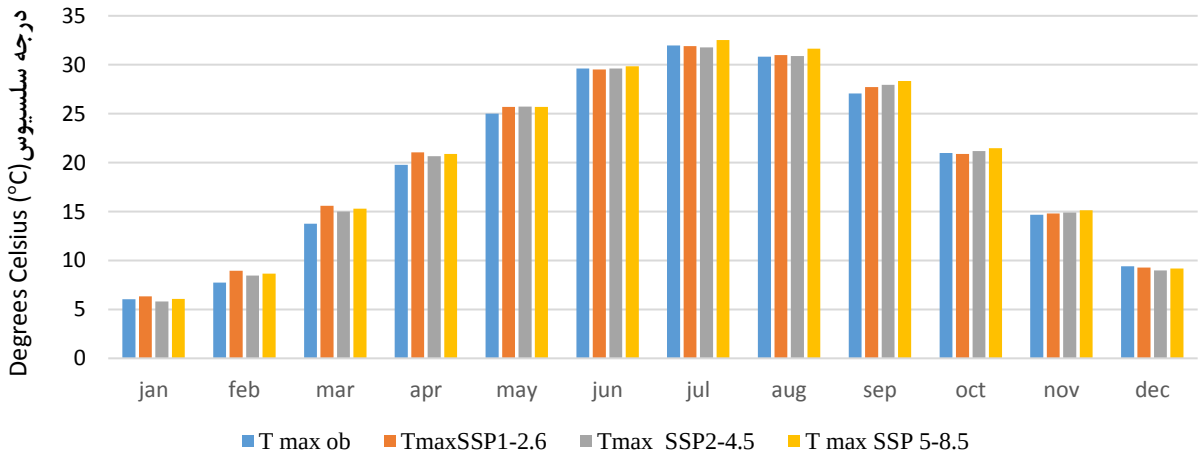


شکل ۱۱– میانگین ماهانه دمای پیش‌بینی‌شده در مقایسه با دوره پایه ایستگاه آب‌وهوا شناسی میدان هوایی کابل

Fig. 11. Comparison of Predicted Monthly Mean Temperature with the Baseline Period for Kabul Airport Meteorological Station

پیش‌بینی دمای بیشینه

پیش‌بینی میانگین بیشینه دمای ماهانه نشان می‌دهد که روند دما نسبت به دوره پایه افزایش‌یافته است. فقط در ماه‌های ژانویه، نوامبر و دسامبر هیچ روندی نداشته و در سایر سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب به میزان ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش‌یافته است (شکل۱۲).



شکل ۱۲– میانگین ماهیانه دمای پیش‌بینی‌شده در مقایسه با دوره پایه ایستگاه آب‌وهوا شناسی میدان هوایی کابل

Fig .12. Comparison of Predicted Monthly Mean Temperature with the Baseline Period for Kabul Airport Meteorological Station

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که مقدار سالانه بارش حوضه‌ی کابل در بازه‌ی زمانی ۱۹۷۹-۲۰۲۰ تقریباً ۰/۳۰ درصد یا معادل ۰/۹۳ میلی‌متر افزایش غیر محسوس و دما به‌طور قابل‌توجهی افزایش‌یافته است، تقریباً ۸ درصد یا معادل ۱/۲ درجه سلسیوس افزایش را نشان می‌دهد. پیش‌بینی‌های انجام‌شده حاکی از کاهش بارش و ادامه‌ی روند افزایش دما با شدت بیشتر دارد. میانگین ماهانه دمای کمینه در سناریو SSP1-2.6 (خوش‌بینانه) به میزان ۰/۶ درجه سلسیوس، سناریو SSP2-4.5 (واقع‌نگر) ۰/۷ درجه سلسیوس و در سناریو SSP5-8.5 (بدبینانه) ۰/۸ درجه سلسیوس و دمای بیشینه به ترتیب به میزان ۰/۶ ، ۰/۷ و ۰/۸ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه، افزایش و بارش سالانه نیز حدود۱۱٪ کاهش نسبت به دوره پایه خواهد یافت. از سوی دیگر، پیش‌بینی بارندگی سال‌های آتی در افق زمانی ۳۰ ساله بر اساس سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، حکایت از تغییر رژیم بارش منطقه و به‌طور خاص کاهش نسبت میزان بارش ماه‌های سرد به میزان بارش سایر ماه‌ها، داشته است. لذا در سال‌های آتی نیز از نسبت بارش‌های جامد به بارش‌های مایع کاسته می‌شود. افزایش میانگین بارش و دمای حوضه کابل متاثر از تغییرات در الگوهای اقلیمی منطقه‌ای و جهانی بوده و اثرات زیان بار بر محیط‌زیست و جوامع محلی گذاشته است.

به اثر تغییرات اقلیمی افزایش دما و تغییر الگوی بارش، یعنی کاهش بارندگی در فصل زمستان و افزایش بارش به فصول پاییز، تابستان و نیمه‌ی دوم بهار، تبدیل‌شده است. به‌علاوه، نوع بارش نیز تغییر کرده، به‌طوری‌که مقدار برف در زمستان کاهش گردیده و مقدار باران‌های موسمی افزایش قابل‌ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. از طرف دیگر پتانسیل بارش‌های رگ‌باری، وقوع روان‌آب و سیلاب با شدت بالا در سایر فصول خصوصاً فصل بهار بیشتر بوده، که باعث خسارات زیان‌بار بر زیرساخت‌های شهری و روستایی، ازجمله جاده‌ها، پل‌ها، خانه‌های مسکونی، مدارس و بیمارستان‌ها شده و همچنین، این سیلاب‌ها باعث از بین رفتن مزارع و محصولات کشاورزی، تخریب زمین‌ها، ایجاد خسارات در جوامع و از دست دادن زندگی و اموال انسان‌ها گردیده است. افزایش سیلاب‌های ویرانگر و تنش در منابع آبی حوضه‌ی کابل کماکان و با شدت بیشتری در دوره آتی پیش‌بینی‌شده است.

نتایج این تحقیق به‌طور مشابه با سایر محققین، مانند رئوفی و همکاران (Raoufi, Taqwa & Attayee, 2024) به بررسی تغییرات دما در شهر کابل پرداخته که نتایج تحقیق ایشان از افزایش دما حکایت دارد. هدایت و همکاران (Hedayat, Ebrahimi Khousfi, Omidvar & Sharifi Pichon, 2024) "بررسی عوامل مؤثر بر تغییرات آب‌های سطحی و زیرزمینی کابل افغانستان"، پژوهش رحمتی و همکاران (Rahmati et al., 2024) تحت عنوان "تأثیرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی در ولایت قندهار افغانستان"، صفی و راسخ (Safi & Rasikh, 2024) به "تأثیرات تغییرات اقلیمی بر رودخانه‌های افغانستان"، پژوهش صدیقی و شرشتا (Sidiqi & Shrestha, 2021) در مورد ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آبی حوضه کابل پرداخته نتایج تحقیق ایشان کاهش بارش و افزایش دما را در آینده گزارش کرده است. مایر (Mayar, 2020) "تحلیل جریان رودخانه و پیش‌بینی سیلاب‌ها در حوضه رودخانه کابل"، نشان می‌دهد که در حوضه‌ی کابل، افزایش دما و تغییر الگوی بارش به شکلی است که بارندگی در فصل زمستان کمتر شده و در فصول پاییز، تابستان و نیمه دوم بهار بیشتر می‌گردد. این الگوی تغییرات در تطابق با تحقیقات دیگر در مناطق مختلف جهان نشان می‌دهد که این تغییرات اقلیمی یک الگوی گسترده دارد. پیش‌بینی‌ها نیز ادامه افزایش دما و کاهش بارش را تأیید می‌کند، به‌طوری‌که در آینده انتظار می‌رود که نسبت بارش‌های جامد به بارش‌های مایع کاهش یابد.

References

Aliyar, Q., Dhungana, S., & Shrestha, S. (2022). Spatio-temporal trend mapping of precipitation and its extremes across Afghanistan (1951–2010). *Theoretical and Applied Climatology*, *147*(1-2), 605–626. https://doi.org/10.1007/s00704-021-03851-2

Azari, M., Moradi, H. R., Saghafian, B., & Faramarzi, M. (2016). Assessment of Hydrological Effects of Climate Change in Gourganroud River Basin. *Water and Soil*, *27*(3), 537-547. [In Persian] https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.26051

Babar, Z. A., Zhi, X., Ge, F., Riaz, M., Mahmood, A., Sultan, S., … & Ahmad, M. F. (2016). Assessment of Southwest Asia surface temperature changes: CMIP5 20th and 21st century simulations. *Pakistan Journal of Meteorology*, *13*(25), 1–15. https://www.prdb.pk/article/assessment-of-southwest-asia-surface-temperature-changes-cm-190

Baidar, K., Ihsan, I., Zahid, S., & Nabavi, S. A. (2024). Climate change and its impact on water resources and groundwater in Afghanistan. *Nangarhar University International Journal of Bioscience*. 344-347. http://dx.doi.org/10.70436/nuijb.v3i02.235

Beniston, M., Stephenson, D. B., Christensen, O. B., Ferro, C. A., Frei, C., Goyette, S., ... & Woth, K. (2007). Future extreme events in European climate: An exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, *81*(1), 71-95. https://doi.org/10.1007/s10584-006-9226-z

Bromand, M. T. (2015). *Impact assessment of climate change on water resources in the Kabul River Basin, Afghanistan*. (Master's thesis). Ritsumeikan University, Shiga, Japan, Environmental Systems and Civil Engineering.

Christensen, N. S., Wood, A. W., Voisin, N., & Lettenmaier, D. P. (2004). The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River Basin. *Climatic Change*, *62*(1-3), 337-363. https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000013684.13621.1f

Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R. P., Arias, P. A., Barlow, M., ... & Zolina, O. (2021). Water cycle changes. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. https://centaur.reading.ac.uk/101319/1/101319.pdf

Ekström, M., Fowler, H. J., Kilsby, G. G., & Jones, P. D. (2003). New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. Part 2: Future estimates and use in impact studies. *Journal of Hydrology*, *300*(1-4), 234-251. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.019

Ellison, D., Morris, C. E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., ... & Sullivan, C. A. (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, *43*, 51-61. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002

Fowler, H. J., & Kilsby, C. G. (2007). Using regional climate model data to simulate historical and future river flows in northwest England. *Journal of Climate Change*, *80*, 337-367. http://dx.doi.org/10.1007/s10584-006-9117-3

Frei, C., Schöll, R., Fukutome, S., Schmidli, J., & Vidale, P. L. (2006). Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *111*, D06105. http://dx.doi.org/10.1029/2005JD005965

Frich, P., Alexander, L. V., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A. M. G., & Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, *19*(3), 193-212. https://doi.org/10.3354/cr019193

Hasanzai, F. H. (2022). *Assessment and analysis of the impacts of climate change on water resources in five river basins of Afghanistan*. (Master's Thesis). Yazd University, Physical Climatology, Faculty of Physics. [In Persian]

Hedayat, S. J., Ebrahimi Khousfi, M., Omidvar, K., & Sharifi Pichon, M. (2024). Investigation of factors affecting surface and groundwater resources using satellite products (Case study: Kabul, Afghanistan). *Journal of Water and Sustainable Development, 11*(1), 13–24. [In Persian] https://doi.org/10.22067/jwsd.v11i1.2312-1291

IPCC. (2021). *The physical science basis: Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Chapter 11, 955-917. https://doi.org/10.1017/9781009157896.011

Mailhot, A., Duchesne, S., Caya, D., & Talbot, G. (2007). Assessment of future change in intensity-duration-frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrology*, *347*(1-2), 197-210. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.019

Mayar, M. A. (2020). River flow analyses for flood projection in the Kabul River Basin. *Central Asian Journal of Water Research*, *6*(1), 1-17. http://dx.doi.org/10.29258/CAJWR/2020-R1.v6-1/1-17.eng

Mestarshed, M. (2013). *Identifying rainfall and temperature characteristics in Afghanistan*.(Master's thesis). University of Isfahan, Faculty of Geographical Sciences and Planning. [In Persian].

Mestarshed, M. (2014). The climatic characteristics of Afghanistan's rainfall. *Geographical Research Quarterly, 29*(3), 191–202. [In Persian] http://georesearch.ir/article-1-355-fa.html

Nasrati, R. (2018). *Study of the recent half-century drought in the country*. General Information and Communications Department, Academy of Sciences, Kabul, Afghanistan, 41–48 and 79–88. [In Persian]

Omidvar, K., & Khosravi, Y. (2010). Examination of changes in some climatic elements on the northern coasts of the Persian Gulf using the Kendall test. *Journal of Geography and Environmental Planning, 21*(2), 38. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20085362.1389.21.2.4.0

Parsa, S., Zarin, A., Mofidi, A., & Dadashi Rudbari, A. (2024). Impacts of climate change on temperature and precipitation in Afghanistan with emphasis on the Helmand and Harirod basins. *Journal of Water and Sustainable Development, 11*(1), 35–38. [In Persian] https://doi.org/10.22067/jwsd.v11i1.2312-1294

Pokhrel, Y., Felfelani, F., Satoh, Y., Boulange, J., Burek, P., Gädeke, A., ... & Wada, Y. (2021). Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. *Nature Climate Change*, *11*(3), 226-233. https://doi.org/10.1038/s41558-020-00972-w

Rahimi, D., & Zarei, F. (2019). Effects of climate change on the volume of water resources and inter-basin water transfer. *Irrigation and Engineering Sciences (Scientific Journal of Agriculture), 42*(3), 61–74. [In Persian] https://doi.org/10.22055/jise.2017.21862.1565

Rahmati, J., Darmel, M. B., Ullah, S., & Ghaforzai, A. (2024). Impacts of climate change on groundwater resources in Afghanistan: A case study of Kandahar Province. *Nangarhar University International Journal of Bioscience*, 291-295. http://dx.doi.org/10.70436/nuijb.v3i02.221

Raoufi, H., Taqwa, S., & Attayee, S. N. (2024). Temperature trend analysis: A case study of Kabul, Afghanistan. *Meteorology, Hydrology and Water Management, 12*(1). https://doi.org/10.26491/mhwm/194452

Safi, A. G., & Rasikh, K. (2024). Climate change effects on the rivers of Afghanistan. *Nangarhar University International Journal of Bioscience*. 313-317. https://doi.org/10.70436/nuijb.v3i02.226

Salehi, F. A. (2022). *Synoptic analysis of heavy snowfall events in Afghanistan*. (Master's thesis). Yazd University, Department of Geography, Atmospheric Sciences. [In Persian]

Sharafat, A. (2020). *Synoptic study of maximum daily rainfall in Kabul Province*. (Master's thesis*)* Yazd University, Department of Geography, Atmospheric Sciences. [In Persian]

Sidiqi, M., & Shrestha, S. (2021). Assessment of climate change impact on the hydrology of the Kabul River Basin, Afghanistan. *Journal of Water Engineering and Management, 2*(1), 1–21. https://doi.org/10.47884/jweam.v2i1pp01-21

Souvignet, M., Gaese, H., Ribbe, L., Kretschmer, N., & Oyarzun, R. (2008). Climate change impacts on water availability in the arid Elqui Valley, North Central Chile: A preliminary assessment. In *IWRA World Water Congress*, Montpellier, France.

Steele-Dunne, S., Lynch, P., McGrath, R., Semmler, T., Wang, S., & Hanafin, J. (2008). The impacts of climate change on hydrology in Ireland. *Journal of Hydrology*, *356*(1-2), 28-45. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.025

Swain, D. L., Singh, D., Touma, D., & Diffenbaugh, N. S. (2020). Attributing extreme events to climate change: A new frontier in a warming world. *One Earth*, *2*(6), 522-527. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.011

Vol.14, No.2, Summer 2025, p.88-121 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

Research Article DOI: 10.22067/geoeh.2025.90342.1526 Open Access

Assessing the Risks of Climate Change on Wetland Ecosystems Using the GCM Model (Case Study: Alagol, Ajigol and Almagol Wetlands: Golestan Province)

Saleh Arekhi [1]*, Abolghasem Mamashli [2], Abdolhafez Panahi[3]

[1] Department of Geography, Faculty of Human Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran
[2] Department of Survey, non-profit Lampi Gorgani Institute, Gorgan, Iran
[3] General Department of Meteorology, Golestan Province, Golestan, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 19 October 2024

Revised: 30 January 2025

Accepted: 19 April 2025

Available Online: 19 April 2025

Keywords:

Climate Change

Ecological Risk Assessment

Climate Change Modeling

Wetland Vulnerability

Alagol–Ajigol–Almagol Wetlands

ABSTRACT

The present research based on the nature of the problem and subject under investigation, adopts a descriptive-analytical approach with the aim of identifying ecological stressors caused by climate change in wetlands. In the climate change section, simulation data of average rainfall from the HadCM3 model using LARS-WG under the SRES A1B scenario for the period 2021–2050 were utilized. The AHP method and Expert Choice software were employed to weight risk factors and assess the indicators influencing risk levels. According to the modeling results, the rainfall series at the Inche-Brun station shows a decreasing trend. Additionally, both maximum and minimum temperatures exhibit an increasing trend. The primary risks threatening the wetland include drought, water shortage, increased evaporation and transpiration, sedimentation and infilling, and habitat loss. Since the most significant risks, as identified based on the ALARP principle, are classified as high or medium, it is essential to control, eliminate, or reduce these risks. Given the ongoing degradation of wetlands, it is crucial to incorporate these processes and their consequences into future wetland management plans. As drought has been identified as the most critical risk, establishing a drought monitoring network and calculating and allocating environmental water rights for wetlands are the most important management strategies to prevent a drought crisis.

*Corresponding author: Dr. Saleh Arekhi E-mail address: S.arekhi@gu.ac.ir

How to cite this article: Arekhi, S., Mamashli, A., & Panahi, A. (2025). Assessing the Risks of Climate Change on Wetland Ecosystems Using the GCM Model (Case Study: Alagol, Ajigol and Almagol Wetlands: Golestan Province). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(2), 88-121. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.90342.1526

©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

Wetlands should be considered as biological reservoirs, and international programs for the reasonable and rational protection and exploitation must be prepared and implemented in order to ensure the survival of wetlands and their biodiversity. Environmental risk assessment is a step beyond human risk assessment, and in it, in addition to examining and analyzing various aspects of risk, a full understanding of the environment of the affected area, its sensitivity, and its special ecological values are also analyzed and evaluated.

Climate change refers to changes in the climatic behavior of a region compared to historical or expected patterns over a long period of time. This phenomenon is one of the most important challenges in sustainable development, with significant negative effects on land and sea ecosystems. Until recently, climate change was considered to be caused by natural factors only, but in recent years, human activity has also contributed to the climate change process. Climate change and loss of biodiversity are among the global challenges that may lead to an increased risk of losing ecosystem services.

Various studies have been conducted on the evaluation of the vulnerability of wetlands worldwide, focusing on the impacts of climate change. Using climate scenarios, models, and change analysis, it was determined that about 10% of wetland functions will be affected in the future due to climate change.

Jafari-Azer et al. (2017), in their article, evaluated and analyzed the environmental risks of Khorkhoran International Wetland using multi-criteria decision-making methods. They identified wetland risk indicators using the Delphi method and ranked and prioritized threats using AHP and TOPSIS methods. The results indicate that, according to the degree of closeness (CL+), among the environmental criteria, oil pollution (0.88), illegal fishing (0.87), and fuel smuggling (0.71), and among the natural criteria, drought and climate change (0.72), are the top risks.

Panahi et al. (2023), in an article titled "Investigation of climate change and transformation of natural components with emphasis on floods" (case study: Gorganrood watershed), used LARS-WG and HadCM3 model under the SRA1B scenario between 2011 and 2045. The results showed that human intervention in main streams, urban and rural expansion, dam construction, pasture degradation, and forest destruction are among the primary causes of sudden flooding in the region. This integrated approach highlighted the necessity of continuous evaluation and validation of hydrological and hydraulic models in the Gorganrood basin and its ephemeral streams.

Karami et al. (2023) assessed the vulnerability of ecosystem services of the Hamoon International Wetland to climate change. The results showed that climate change, drought, water diversion in the upstream basin, and livestock and vehicle traffic are the main threats. Diplomatic efforts to secure water supplies are the most important management strategy to reduce vulnerability.

This research provides a framework for managing climate change-related risks in wetlands. Its main purpose is to investigate temperature, precipitation, and climate indicators in the Alagol, Ajigol, and Almagol wetlands. Using statistical data and satellite images, climate changes over different time periods are modeled. Risks are then calculated based on severity and likelihood. A multi-criteria decision-making process is used to prioritize these risks. Finally, suitable management solutions are presented to reduce unacceptable risks.

Material and Methods

Alagol, Ajigol, and Almagol international wetlands are located in Golestan Province, near the Iran–Turkmenistan border, at relatively close distances from one another in the Dashli-Borun region. In this research, the assessment of climate change risks on wetland ecosystems was conducted using the GCM model.

To implement the research objectives—including modeling climate change, forecasting ecological conditions, and identifying and prioritizing ecological risks—20 years of data (2001–2020) on monthly and annual average precipitation and temperature from local meteorological stations were used.
Precipitation and temperature forecasts were generated using outputs from the HadCM3 model, a coupled atmosphere–ocean general circulation model (AOGCM). ArcGIS 10.8 was used for initial data preparation, ENVI 5.3 for radiometric and atmospheric corrections, and IDRISI TerrSet for image classification, pre-processing, change analysis, and model validation. Simulated rainfall data from HadCM3 in LARS-WG under the SRA1B scenario (2021–2050) were analyzed. Statistical indicators such as ME, RMSE, and MSE were used to select the best interpolation method.

Results and Discussion

The region's temperature between 2021 and 2050 is expected to increase by 0.5 to 1.5°C compared to the base period. The results indicate temperature increases across all months and climate scenarios. Scenario A2 shows the highest increase, B1 the lowest (optimistic), and A1B a moderate rise.
Rainfall percentage changes under the three scenarios indicate a decline in most months. Annual rainfall will decrease by 6–8% compared to the base period. Scenario A2 shows the greatest reduction, particularly in March (up to 75%), while B1 shows the smallest, particularly in February (up to 55%). In a few months, slight increases in rainfall are observed, though these are not significant in dry months.
To compare the ecological risks of natural origin with those caused by human activity, the AHP method and Expert Choice software were used. The analysis shows high importance for natural-origin risks. Ecological and human-origin risks each make up nearly half of total risks.
Drought has the highest risk weight at 0.19. Natural-origin risks make up 51%, and human-origin risks 49%. Ten key risks were identified based on ecological conditions, field visits, expert interviews, and previous studies. All identified risks are present and will intensify under future climate conditions.
The most significant climate-related threats to the wetlands include: drought and water shortage, increased evaporation and transpiration, sedimentation and infilling, and habitat loss. According to the ALARP principle, high and medium-level risks must be controlled, reduced, or eliminated. Risks with higher occurrence probability, severity, and extent require prioritized control measures. However, this does not imply that other risks are unimportant, as the final scores were derived by integrating all three risk indicators.

Conclusion

The prioritization results show that the key threats to Alagol, Ajigol, and Almagol wetlands are drought/dehydration, increased evaporation and transpiration, sedimentation and filling, and habitat loss.
By 2035, the area of Alagol, Almagol, and Ajigol wetlands is expected to reach 1747.50 ha, 102.30 ha, and 33.90 ha, respectively. This reflects reductions in Almagol and Ajigol, although Alagol shows a slight increase—still indicating an overall decline in extent over the study period.
Predicted land use maps for 2035 show saline land occupying 13,346.55 ha (63%), vegetation 5,601.78 ha (26.4%), and water surface 2,265.75 ha (10.6%). This reveals decreased water levels and increased salt marshes, signifying drought and reduced rainfall.
The effectiveness of the modeling methods and climate scenarios (HadCM3, A2, A1B1, B2, and LARS-WG) is consistent with the findings of Arkhi et al. (2024), Panahi et al. (2023), and Karami et al. (2022). Additionally, the environmental risk evaluation aligns with the multi-criteria methods used by Jafar-Azer et al. (2019) and Jafari-Azer et al. (2017).

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۱۲۱-۸۸

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2025.90342.1526 دسترسی آزاد

ارزیابی ریسک‌های ناشی از تغییرات اقلیم بر اکوسیستم‌های تالابی با استفاده از مدل GCM (مطالعه موردی: تالاب‌های آلاگل، آجی‌گل و آلماگل: استان گلستان)

صالح آرخی*[۱]، ابوالقاسم ممشلی[۲]، عبدالحافظ پناهی[۳]

[۱] دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران
[۲] کارشناسی ارشد مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه لامعی گرگانی، گرگان، ایران
[۳] دکتری تخصصی آب وهواشناسی، اداره کل هواشناسی استان گلستان، گلستان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰

کلمات کلیدی:

تغییر اقلیم

ارزیابی ریسک اکولوژیکی

مدل سازی تغییرات اقلیمی

زنجیره مارکوف

تالاب‌های آلاگل، آلماگل، آجی گل

چکیده

پژوهش حاضر، با توجه به ماهیت مسئله و موضوع موردبررسی، از نوع توصیفی-تحلیلی و از نوع مطالعات کاربردی با هدف شناسایی عوامل تنش‌زای اکولوژیکی ناشی از تغییر اقلیم تالاب‌ها، انجام شده است. درقسمت تغییر اقلیم داده‌های شبیه‌سازی شده میانگین بارندگی حاصل از مدل HadCM3 در LARS-WG تحت سناریو SRA1B بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ برآورد شده است. به منظور وزن‌دهی به گزینه‌های ریسک و همچنین شاخص های موثر برآورد سطح ریسک از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و نرم‌افزار Expert Choice بهره‌گیری شد. بر اساس نتایج مدل‌سازی، سری‌های بارش در ایستگاه اینچه‌برون با روند کاهش تقریبی همراه بوده است. همچنین دمای حداکثر و دمای حداقل روند افزایشی را نشان می‌دهند. بر طبق نتایج، ریسک‌های تهدید کننده تالاب، خشکسالی، وقوع کم‌آبی، افزایش تبخیر و تعرق، رسوب و پر شدن و از بین رفتن زیستگاه می‌باشد. با توجه به اینکه سطح مهم‌ترین ریسک‌های شناسایی شده بر اساس اصل ALARP (ارزشیابی ریسک) در طبقه‌بندی زیاد و متوسط می‌باشند، باید نسبت به کنترل، حذف یا کاهش ریسک‌ها اقدام کرد. با توجه به اینکه خشکسالی مهم‌ترین ریسک می‌باشد، طراحی شبکه پایش خشکسالی و محاسبه و تخصیص حق‌آبه زیست محیطی تالاب‌ها مهم‌ترین راهکارهای مدیریتی برای جلوگیری از بحران خشکسالی می‌باشند.

* نویسنده مسئول: دکتر صالح آرخی
E-mail: S.arekhi@gu.ac.ir

مقدمه

تغییر اقلیم به تغییرات رفتار اقلیمی یک منطقه در مقایسه با رفتاری که در طول یک دوره زمانی بلند مدت در گذشته از آن منطقه ثبت شده یا مورد انتظار است، می‌گویند (Alizadeh, 2010). این پدیده یکی از مهمترین چالش‌ها در توسعه پایدار می‌باشد که تاثیرات منفی چشمگیری را بر اکوسیستم‌های خشکی و دریایی دارد. در موضوع پیش‌بینی طولانی مدت بلایای جوی-اقلیمی، روش‌های گوناگونی وجود دارد. یکی از این روش‌ها کاربرد خروجی الگوهای گردش عمومی و منطقه‌ای جو می‌باشد. به طور کلی الگوهای اقلیمی بسیار پیچیده و در عین حال ساده هستند. یکی از پیشرفته‌ترین الگوهای اقلیمی، الگوهای GCM یا الگوهای گردش عمومی جو است. این دسته از کامل‌ترین الگوهایی هستند که در حال حاضر به طور چشم‌گیری از آنها استفاده می‌شود. به صورت آنالیز سه بعدی بوده و سیستم‌های اقلیمی را با لحاظ نمودن بیشتر فرآیندها و پارامترهای اقلیمی پیش‌بینی می‌نمایند (Arekhi, Gerkaz & Emadadin, 2024).

از نظر تنوع زیستی تالاب‌ها به عنوان کانون‌های حساس آنچنان باید و شاید مانند زیستگاه‌های خشکی مورد توجه دانشمندان قرار نگرفته‌اند و تنها کنوانسیون رامسر و بخش تالاب‌های اتحادیه بین‌المللی حفاظت از طبیعت (I.U.CN [1]) فعالیت‌هایی را برای حفاظت از تالاب‌ها انجام می‌دهند در صورتی که باید به تالاب‌ها به عنوان مخازن زیستی نگریسته شود و برنامه‌های بین‌المللی برای حفاظت و بهره‌برداری معقول و منطقی تهیه و اجرا شود تا بتوان از بقای تالاب‌ها و تنوع زیستی آنها اطمینان حاصل کرد (Ramsar Convention Secretariat, 2007).

تالاب‌ها با توجه به موقعیت جغرافیایی و وضعیت اکولوژیکی زیستگاه مهم و با ارزشی برای جمعیت‌های آبزی و کنار آبزی اعم از بومی و مهاجر در تابستان و زمستان می‌باشد. حفاظت تالاب‌ها تنها به منظور حراست از پرندگان آبزی و حمایت از جمعیت‌های نادر و کمیاب آن نبوده بلکه اهمیت این پهنه‌های آبی از لحاظ زیستگاه گیاهی و جانوری و ایجاد تعادل بیولوژیک و اکولوژیک و فواید اقتصادی و اجتماعی نیز قابل توجه است.ارزیابی ریسک محیط زیستی گامی فراتر از ارزیابی ریسک انسانی بوده و در آن علاوه بر بررسی و تحلیل جنبه‌های مختلف ریسک، ضمن شناخت کامل از محیط زیست منطقه تحت تاثیر، میزان حساسیت محیط متاثر و همچنین ارزش‌های خاص محیط زیستی منطقه نیز در تجزیه و تحلیل و ارزیابی در نظر گرفته می‌شود (Heller & Zavaleta, 2009).

تغییر الگوهای بارش و دما ناشی از تغییر اقلیم ، فرآیندهای فیزیکی و اکولوژیکی تالاب را تحت تاثیر قرار می‌دهند. درک اثرات تغییر اقلیم روی موجودات زنده تالاب و فرآیندهای هیدرولوژیکی چالشی است که منجر به پیچیدگی فضایی و مکانی زیستگاه‌های تالابی می‌شود. اثر عمده تغییر اقلیم مربوط به تغییرات کمیت و کیفیت عرضه آب و در نتیجه تغییر کاربری اراضی و رژیم‌های هیدرولوژیکی است. این امر می‌تواند منجر به کاهش ظرفیت عملکردی یا تغییر محل جغرافیایی تالاب شود (Brooks, 2009). تغییر اقلیم ریسک‌هایی را برای سیستم‌های طبیعی و انسانی به وجود می‌آورد که ارزیابی ریسک‌های اقلیمی و مدیریت آنها به نظر ضروری می‌رسند. مدیریت ریسک اقلیم رویکردی سیستماتیک برای ملاحظه روندهای مرتبط با اقلیم و رویدادهایی در توسعه تصمیم‌گیری برای به حداقل رساندن خطرات بالقوه می‌باشد. تغییر اقلیم ماهیت ریسک اقلیم را تغییر می‌دهد، عدم قطعیت را افزایش داده و ما را مجبور به ارزیابی مجدد شیوه‌های مدیریت ریسک اقلیم متداول می‌کند (UNDP[۲], 2013).

پژوهش‌های مختلفی در مورد ارزیابی آسیب‌پذیری تالاب‌ها در جهان انجام شده که تاکید و تمرکز آنها بیشتر بر آسیب‌پذیری تالاب‌ها تحت تاثیر تغییرات اقلیمی بوده است (Rahimi Blouchi & Malekmohammadi, 2013). اثرات تغییر اقلیم روی کارکردهای تالابی با استفاده از سناریو اقلیم، مدل اقیلم و آنالیز تغییر اقلیم مشخص گردید که حدود ۱۰ درصد عملکردهای تالاب در آینده در اثر تغییر اقلیم، دست خوش تغییر خواهند شد. خلیانی و همکاران (Khalyani et al., 2016)، نیز در مطالعه‌ای با استفاده از روش

1 -International Union for Conservation of Nature 2-United Nations Development Program

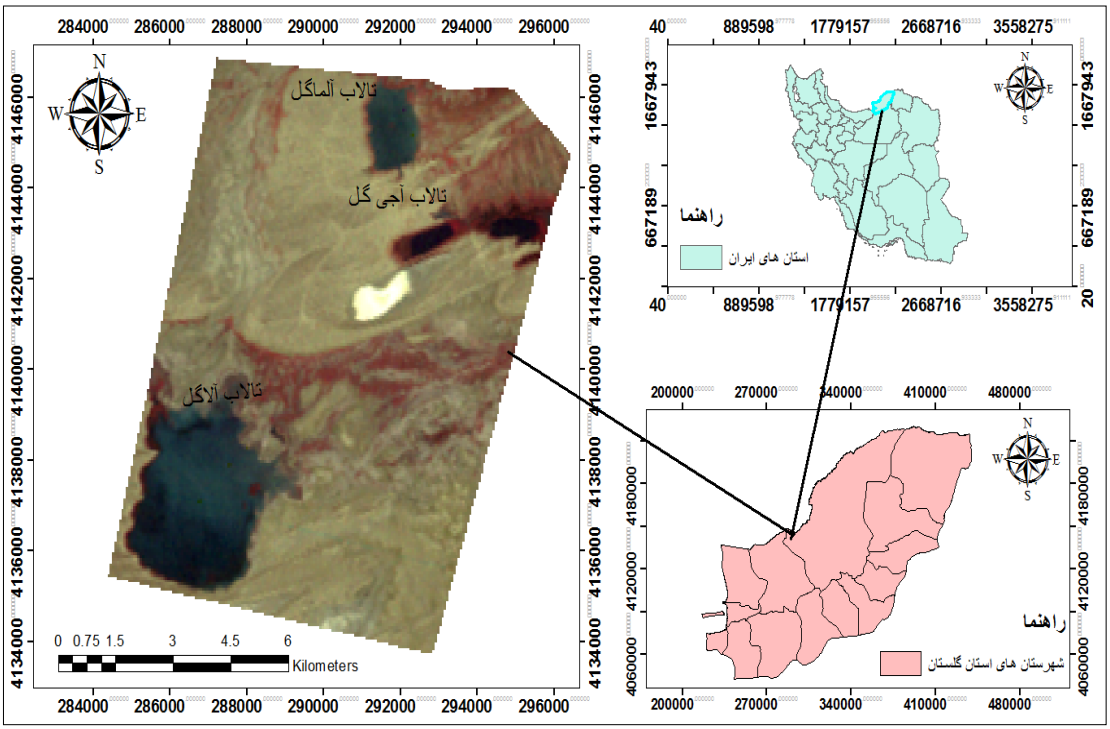
ریزمقیاس نمایی آماری و تحت سه سناریو اقلیمی A2، A1B1 و B2 به بررسی بارش، تبخیر تعرق، کمبود بارش و کاهش نسبی عملکرد- محصول پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که در اثر تغییر اقلیم، فصل بارش مرطوب‌تر و فصل خشکی خشک‌تر خواهد شد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که میزان تبخیر تعرق در ماه‌های خشک با کاهش بارندگی و افزایش دما افزوده خواهد شد. ملک‌محمدی و همکاران (Malekmohammadi, Blouchi, Ghehi & Shakib, 2015)، اثرات تغییر اقلیم را روی تالاب چغاخور با استفاده از ارزیابی ریسک و سنجش از دور مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور دما و بارش در یک دوره ۲۰ ساله بررسی شد. سپس تصمیم‌گیری چند معیاره برای اولویت بندی ریسک‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت راهکارهای مدیریتی به منظور کاهش ریسک‌ها ارائه شد. جعفری‌آذر و همکاران (Jafariazar, Sabzghabaei, Tavakoly & Dashti, 2017) در مقاله ارزیابی و تحلیل ریسک‌های زیست محیطی تالاب بین‌المللی خورخوران ریسک‌های شاخص تالاب را با روش دلفی شناسایی و به منظور رتبه‌بندی و مشخص نمودن اولویت عوامل تهدید، از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره AHP و TOPSIS استفاده کردند. نتایج حاکی از آن است که به ترتیب برحسب میزان نزدیکی (CL+) از بین معیارهای زیست‌محیطی، آلودگی‌های نفتی (۰/۸۸)، صید بی‌رویه و غیرمجاز (۰/۸۷) و قاچاق سوخت (۰/۷۱) و از میان معیارهای طبیعی، خشکسالی و تغییرات اقلیم (۰/۷۲) در اولویت‌های اول و سایر ریسک‌ها در رتبه‌های بعدی جای دارند. با توجه به نتایج به‌دست آمده اولویت‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی در جهت کاهش تأثیر و پیامدهای ریسک‌ها که اثرات جبران‌ناپذیری بر محیط‌زیست و عملکرد تالاب دارند، می‌بایست مورد توجه جدی قرار گیرند. جعفری‌آذر و همکاران (Jafariazar, Sabzghabaei, Tavakoly & Dashti, 2019) در مقاله ارزیابی ریسک زیست‌محیطی تالاب بین‌المللی رودهای شور، شیرین و میناب بر اساس روش‌های تصمیم گیری چند معیاره با هدف شناسایی و تجزیه و تحلیل ریسک‌های تهدیدکننده تالاب بین‌المللی صورت پذیرفت. نتایج حاکی از آن است که به ترتیب برحسب میزان نزدیکی (CL+)چهار عامل آلودگی نفتی (۰/۹۱)، احداث سد در بالادست (۰/۸۱)، پدیده خشکسالی و تغییرات اقلیم (۰/۸۰) و قاچاق سوخت (۰/۷۵) در رده غیرقابل تحمل برای تالاب قرار دارند. بنابراین بدون تردید شناخت درست و دقیق از عوامل تهدید کننده تالاب‌ها بر اساس اهمیت ومیزان تأثیرگذاری آن‌ها می‌تواند زمینه را برای جلوگیری و مقابله اصولی‌تر با این عوامل و نیز تهیه و اجرای دقیق طرح‌های حفاظت از تالاب‌ها و مدیریت محیط‌زیستی آن‌ها فراهم آورد. مهدی‌نسب و باقرزاده‌کریمی (Mehdinasab & Bagherzadeh Karimi, 2020) در مقاله‌ای به ارزیابی ریسک‌های زیست محیطی تالاب‌های پلدختر بر اساس مدل EFMEA پرداختند. نتایج نشان داد که از نظر اکولوژیکی: آتش‌سوزی نیزارها و زهکشی تالاب‌های گوری بلمک و پیکه، از لحاظ هیدرولوژیک تهدید افزایش بار رسوب معلق، خشکسالی‌های دوره‌ای و حفر چاه‌های عمیق و نیمه عمیق در آبخوان تالاب‌ها ست در مجموع ۸۸/۲ درصد از ریسک در رده بدون ریسک، ریسک کم و متوسط و تنها ۸/۱۸ درصد ریسک‌ها در حد ریسک زیاد و بی نهایت قرار دارند که نیازمند اقدامات فوری از سوی متولیان حفاظت و نگه‌داری از تالاب‌ها برای کاهش خطرات این ریسک‌ها می‌باشند. پناهی و همکاران (Panahi, Janbaz Ghobadi, Motavalli & Khaledi, 2024) مقاله‌ای تحت عنوان بررسی تغییر اقلیم و دگرگونی مولفه‌های طبیعی با تاکید بر سیلاب (مطالعه موردی: حوضه آبخیزگرگانرود) با استفاده ار مدل LARS-WG و HadCM3 تحت سناریو SRA1B بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۵ برآورد شده است. نتایج حاصل از این رویکرد نشان داد مداخله انسان در جریان‌های اصلی، پراکندگی شهری و روستایی، ایجاد آب‌بندان و تخریب مراتع و آسیب به جنگل‌ها از اصلی‌ترین عواملی است که در ایجاد سیلاب‌های ناگهانی در منطقه موثر بوده است. این رویکرد یکپارچه ، ضرورت ارزیابی و اعتبارسنجی مداوم مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی را در حوضه گرگانرود و جریان‌های زودگذر آشکار کرد. نتایج تحقیق نشان داد که مناطق بسیار خطرناک سیل در نزدیکی شبکه زهکشی یافت شده است. تلاش دیپلماتیک برای تامین حق‌آبه تالاب مهم‌ترین راهکار مدیریتی کاهش آسیب‌پذیری آن است. تالاب‌های آلاگل، آجی‌گل و آلماگل با توجه به موقعیت جغرافیایی و وضعیت اکولوژیکی زیستگاه مهم و با ارزشی هستند بنابراین اطلاع از چگونگی رخداد تغییرات بارندگی و دما و ریسک‌های ناشی از تغییر اقلیم در آینده، با توجه به نقش مهمی که این تالاب‌ها در حیات منطقه و استان گلستان دارد، ضروری است.

به ویژه اینکه می‌تواند در مدیریت محیط زیستی به خصوص در مدیریت منابع آب و خشکسالی، کشاورزی پایدار در منطقه، جلوگیری از بروز سیلاب‌های فصلی و پیشگیری از فرسایش خاک در حوضه، مؤثر واقع شود.

این تحقیق چارچوبی را برای مدیریت ریسک‌های ناشی از تغییر اقلیم تالاب‌ها فرآهم می‌آورد. هدف اصلی این تحقیق بررسی دما، بارش و شاخص‌های اقلیمی در تالاب‌های آلاگل، آجی‌گل و آلماگل می‌باشد. برای این منظور، با استفاده از داده‌های آماری و تصاویر ماهواره‌ای، تغییرات اقلیم در دوره‌های زمانی مختلف مدل‌سازی و سپس ریسک‌های ناشی از تغییر اقلیم بر اساس شدت و احتمال وقوع بر شمرده شدند. برای اولویت‌بندی ریسک‌های موجود از روش فرآیند تصمیم‌گیری چند معیاره استفاده و در نهایت راهکارهای مدیریتی متناسب، به منظور کاهش ریسک‌های غیر قابل قبول ارائه گردید.

منطقه مورد مطالعه

تالاب‌های بین‌المللی آلاگل، آجی‌گل و آلماگل در استان گلستان و در نزدیکی مرز ایران و ترکمنستان در فاصله نزدیکی نسبت به هم در بخش‌داشلی برون واقع شده‌اند. مساحت این سه دریاچه به ترتیب ۲۵۰۰ هکتار، ۳۲۰ هکتار وسعت و ۲۰۷ هکتار می‌باشد (شکل ۱). ارتفاع زمین از سطح دریای آزاد در عمیق‌ترین نقاط تالاب در آلاگل (۶- متر) و در تالاب‌های آجی‌گل و آلماگل (۴- متر) گزارش شده است. آب و هوای منطقه، مدیترانه‌ایی گرم و دارای تابستان‌های خشک و گرم و زمستان‌های ملایم است. میزان بارندگی سالیانه ۳۰۰- ۲۵۰ میلی‌متر است.

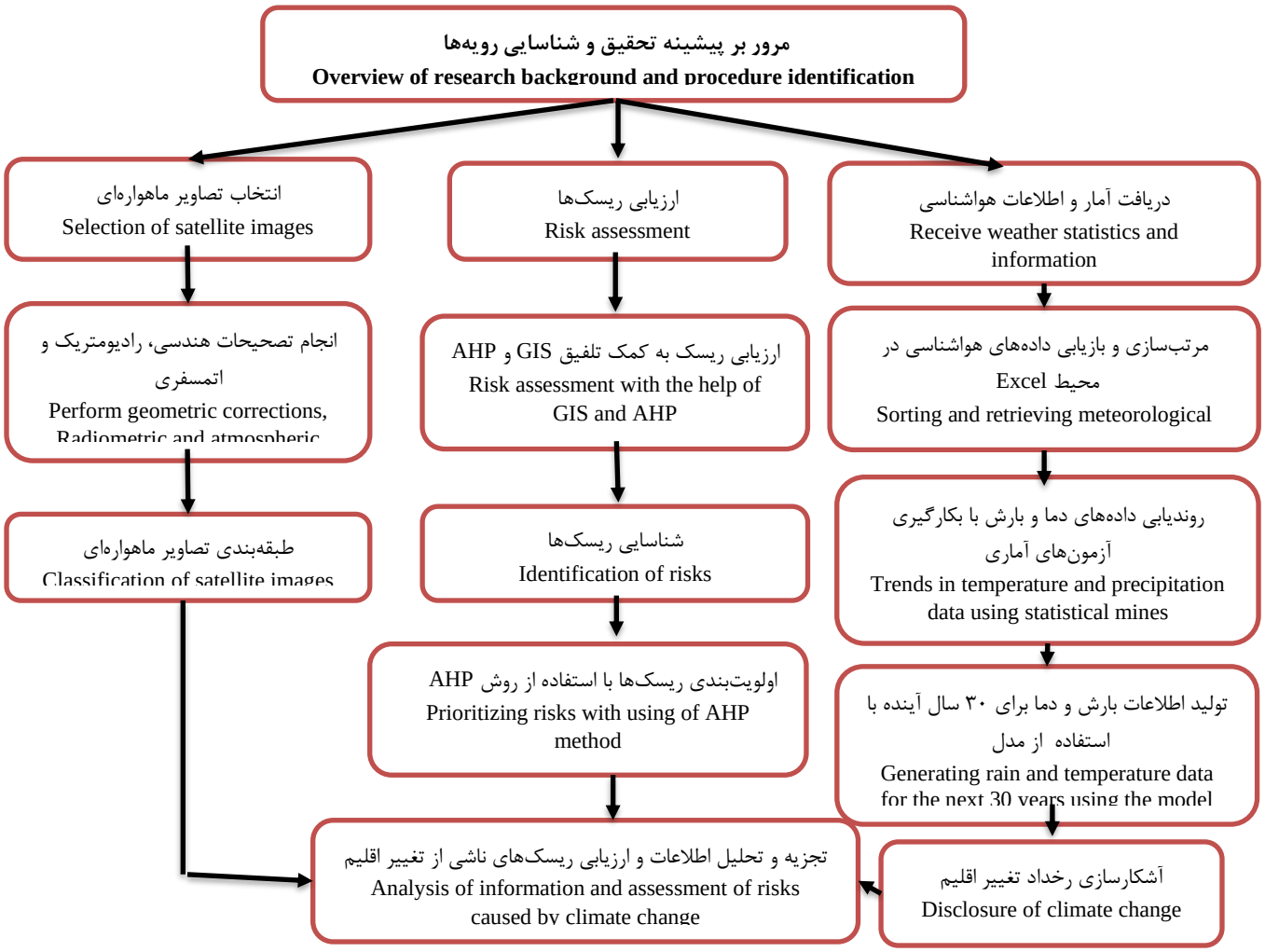


شکل ۱- نقشه موقعیت تالاب‌های آلاگل، آلماگل و آجی گل

Fig. 1. Location map of Alagol, Almagol and Ajigol

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر، با توجه به ماهیت مسئله و موضوع مورد بررسی، از نوع توصیفی - تحلیلی است و از نوع مطالعات کاربردی با تأکید بر روش‌های کمی است، در تحقیق حاضر، ارزیابی ریسک‌های ناشی از تغییرات اقلیم بر اکوسیستم‌های تالابی با استفاده از مدل GCM[1] انجام گرفت. به منظور اجرای اهداف در نظر گرفته شده شامل: مدل‌سازی تغییر اقلیم، پیش‌بینی وضعیت اکولوژیکی و همچنین شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌های اکولوژیکی ناشی از تغییر اقلیم تالاب‌های آلاگل، آجی‌گل و آلماگل از آمار ایستگاه هواشناسی که دارای آمار ۲۰ ساله میانگین بارش و میانگین دما در فواصل سال‌های (۲۰۲۰-۲۰۰۱) بوده‌اند و در مقیاس ماهانه و سالانه استفاده شد. این اطلاعات از سازمان هواشناسی کشور و وزارت نیرو اخذ گردید. در شکل ۲ مدل مفهومی تحقیق نشان داده شده است.



شکل ۲- مدل مفهومی تحقیق

Fig. 2. Conceptual research model

1-General Circulation Model

در تحقیق حاضر پیش‌بینی داده‌های بارش و دما با استفاده از خروجی‌های مدل HadCM3 انجام شده است. این مدل از نوع مدل‌های گردش عمومی جفت شده جوی–اقیانوسی (AOGCM[1]) است. در مرکز هادلی سازمان هواشناسی انگلیس طراحی و توسعه یافته است. توصیف این مدل توسط توسط گوردون و همکاران (Gordon et al., 2000) انجام شده است. HadCM3 از دو مؤلفه جوی و اقیانوسی به نام‌های HadAM3 (مدل جوی) و HadOM3 (مدل اقیانوسی) که دارای یک مدل یخ-دریا نیز است، تشکیل شده است. هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) از داده‌های مدل گردش عمومی HadCM3 برای تهیه گزارش سوم استفاده کرده است. این مدل نیازی به تنظیمات شار سطحی (شار مصنوعی اضافی برای سطح اقیانوس) برای بهبود شبیه‌سازی ندارد. شبیه‌سازی‌ها بر مبنای تقویم سال ۳۶۰ روزه و ماه‌های ۳۰ روزه انجام می‌شود. قدرت تفکیک بالای مؤلفه اقیانوسی، مهم‌ترین مزیت این مدل است. از جمله دیگر مزیت این مدل هماهنگی خوب بین مؤلفه‌های جوی و اقیانوسی آن است.

شبکه جهانی نقاط مدل HadCM3 در ابعاد ۲/۵×۳/۷۵ درجه در ایران شامل ۴۲ نقطه می‌باشند. مدل‌های گردش عمومی، پیش‌بینی‌ها را بر اساس سناریوهایی انجام می‌دهند که هرکدام از این سناریوها بر مبنای فرضیات مختلفی راجع به نیروهای محرکه اعم از توسعه جمعیتی، تکنولوژیکی و اقتصادی و اجتماعی استوار می‌باشند که به آن‌ها سناریوی انتشار نیز اطلاق می‌شود. IPCC[2] در سال ۱۹۹۶ در یک گزارش ویژه سری جدیدی از سناریوهای انتشار را تحت عنوان SRES8 ارائه داد. در این گزارش، ۴۰ سناریو برای آینده جهان ارائه شده که در چهار شاخه اصلی (A1، A2، B1، B2) قرار می‌گیرند (Kim, Choi, Choi & Park, 2013). این پیش‌بینی‌ها بر اساس سناریوهای مختلفی صورت می‌گیرد که هر یک بیانگر وضعیتی[3] از تولید گازهای گلخانه‌ای و عوامل مؤثر بر کنترل و تولید این گازها است. به منظور پیش‌بینی داده‌های آب و هوایی در مقیاس محلی به داده‌های پیش‌بینی کننده بزرگ مقیاس که توسط این مدل شبیه‌سازی می‌شوند، نیاز است. در آخرین نسخه مدل LARS–WG، ۱۵ مدل گردش عمومی (GCM)، که همگی از گزارش چهارم IPCC (AR4) اخذ گردیده، گنجانده شده است (Chen, Xu & Guo, 2012).

از نرم‌افزار Arc GIS10.8 برای آماده‌سازی اولیه داده‌ها، از نرم‌افزار ENVI5.3 برای انجام تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری و از نرم‌افزار IDRISI Terrset برای طبقه‌بندی تصاویر و عملیات پیش‌پردازش، پردازش، تحلیل تغییرات، تأثیرات و روابط نیروهای محرکه در رابطه با تغییرات صورت گرفته، مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات و اعتبار سنجی مدل، استفاده گردیده است. داده‌های شبیه‌سازی شده میانگین بارندگی حاصل از مدل Hadcm3[4] در LARS-WG تحت سناریو SRA1B بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ برآورد شده است بدین منظور جهت انتخاب بهترین روش درون‌یابی از شاخص‌های آماری از قبیل ME، RMSE و MSE استفاده گردید. یکی از مهم‌ترین راهبردهای موجود در زمینه وزن‌دهی تکنیک‌های کمی و ریاضی است (Aghashahi, Ardestani & Fahmi, 2013). در پژوهش حاضر با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (روش AHP) به منظور وزن‌دهی به گزینه‌های ریسک‌های ناشی از تغییر اقلیم، از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و نرم‌افزار Expert Choice بهره‌گیری شد. معیارهای متناسب و سازگار را مورد ارزیابی قرار دادیم. با توجه به اینکه ارائه کلیه نتایج مدل‌ها در این پژوهش به دلیل حجم زیاد موارد صورت نگرفت. جدول ۱ مشخصات ایستگاه هواشناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد.

1 -Atmosphere-Ocean General Circulation Model
2 -ntergovernmental Panel on Climate Change
3-Hadley Centre Coupled Model, version 3

جدول ۱- مشخصات ایستگاه هواشناسی منطقه مورد مطالعه

Table 1- Characteristics of the meteorological station in the study area

ردیف Row	نام ایستگاه Station Name	نوع ایستگاه Station Type	ارتفاع Altitude	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude
1	اینچه‌برون Inche-Brun	کلیماتولوژی Climatology	10	54/72	34/45

در تحقیق حاضر جهت ارزیابی عملکرد مدل LARS–WG و اطمینان بیشتر از توانایی آن در پیش‌بینی پارامترهای آب و هوایی دما و بارش، علاوه بر آزمون‌های آماری (t-test, F-test و Chi-square) که در خود مدل در مرحله اعتبارسنجی صورت می‌گیرد، شاخص‌های عملکردی، ضریب تبیین (R^2)، میانگین خطای مطلق (MAE) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز به کار گرفته شده است. ضریب تبیین معیاری بدون بعد است و بهترین مقدار برای آن برابر یک است. میانگین خطای مدل و مجذور میانگین مربعات خطا، نشان‌دهنده میزان خطای مدل می‌باشند و بهترین مقدار برای آن‌ها برابر صفر است.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{n}(X_i-\mu_x)(Y_i-\mu_y)]^2}{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\mu_x)^2 \sum_{i=1}^{n}(Y_i-\mu_y)^2} \quad (۱)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|X_i-Y_i|}{n} \quad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{n}(X_i-Y_i)^2}{n}} \quad (۳)$$

در روابط فوق Xi و Yi به ترتیب iامین داده مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل هستند. μx و μy میانگین کل داده‌های Xi و Yi در جامعه آماری و n تعداد کل نمونه های مورد ارزیابی می‌باشند (Arekhi et al., 2024; Panahi, Janbaz Ghobadi, Motavalli & Khaledi, 2023).

پس از بررسی نتایج مرحله واسنجی و مقادیر بالای ضریب تعیین و مقادیر پایین شاخص‌های خطاسنجی محاسبه شده، از قابلیت مدل LARS-WG در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی اطمینان حاصل شد.

مدل LARS-WG[1]

یکی از مدل‌های مولد داده‌های تصادفی آب و هوایی است که برای شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی روزانه در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم حاضر و آینده به کار می‌رود (Semenov, Brooks, Barrow & Richardson, 1998). اولین نسخه این مدل در سال ۱۹۹۰ در شهر بوداپست مجارستان ارائه شد و سپس در سال ۱۹۹۸ توسط سمونو بازنگری شد. این مدل برای مدل‌سازی پارامترهای آب و هوایی، توزیع‌های آماری پیچیده‌ای را به کار می‌برد. مدل LARS-WG از داده‌های آب و هوایی روزانه مربوط به یک ایستگاه استفاده می‌کند تا با محاسبه مجموعه‌ای از پارامترها، توزیع احتمالاتی پارامترهای آب و هوایی و نیز ارتباط بین آن‌ها را شناسایی کند. برای تولید داده‌های مصنوعی اطلاعات ورودی به مدل، داده‌های روزانه بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر و تابش خورشیدی یا در صورت نبود ساعات آفتابی حداقل ۳۰ سال است. در تولید داده‌های مصنوعی اولین قدم، مدل‌سازی سری

1-Lang Ashton Research Station Weather Generator

روزهای تر و خشک است. این مدل به منظور شبیه‌سازی طول روزهای تر و خشک، بارش روزانه و تابش خورشیدی از توزیع نیمه تجربی زیر استفاده می‌کند که این توزیع به‌عنوان یک تابع تجمعی توزیع احتمال تعریف می‌شود.

$$EPM = \{a_0, a_i, h_i, i = 0,....10\} \quad (۴)$$

تعداد بازه‌هایی که در توزیع نیمه‌تجربی استفاده می‌شود، در نسخه جدید مدل برابر ۲۳ است که در مقایسه با نسخه‌های قبلی که از ۱۰ مورد استفاده می‌شد، نمایش دقیق‌تری از توزیع مشاهداتی را نشان می‌دهد(Chen et al., 2012).

اجرای مدل LARS-WG

ابتدا داده‌های دوره پایه (۲۰۲۰-۲۰۰۱) مرتب شد و فایل ورودی مدل تهیه گردید. پس از پردازش و مرتب‌سازی داده‌ها و تهیه فایل‌های ورودی، مدل برای دوره پایه اجرا شد. بدین ترتیب مرحله واسنجی مدل به پایان رسید. در مرحله بعد با استفاده از آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) که روابط آنها در بالا آمده است، اقدام به ارزیابی داده‌های تولید شده توسط مدل گردید.

پس از بررسی نتایج مرحله واسنجی و مقادیر بالای ضریب تعیین و مقادیر پایین شاخص‌های خطاسنجی محاسبه شده، از قابلیت مدل LARS-WG در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی اطمینان حاصل شد. سپس این مدل جهت ریز مقیاس نمایی آماری داده‌های مدل گردش عمومی جو و تولید داده مصنوعی برای دوره آتی با استفاده از سه سناریوی B1، A2 و A1B (به ترتیب خوشبینانه، بدبینانه و متوسط) تأیید شده توسط هیئت بین الدول تغییر اقلیم و دو مدل HadCM3 اجرا شد. بدین ترتیب مقادیر روزانه پارامترهای مذکور برای دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ تولید گردید.

سپس این مدل جهت ریز مقیاس نمایی آماری داده‌های مدل گردش عمومی جو و تولید داده مصنوعی برای دوره آتی با استفاده از سه سناریوی A1B, A2, B1 (به ترتیب خوشبینانه، بدبینانه و متوسط) تأیید شده توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم و مدل Hadcm3 اجرا شد. بدین ترتیب مقادیر روزانه پارامترهای مذکور برای دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ تولید گردید.

نتایج و بحث

ایستگاه اینچه‌برون به عنوان ایستگاه مبنا برای بررسی تغییرات اقلیمی منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد. روند تغییر دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش در دوره پایه ۲۰۲۰-۲۰۰۱ مورد بررسی قرار گرفت. مجموع بارش سالانه ایستگاه اینچه‌برون در دوره اقلیمی ۲۰۲۰-۲۰۰۱ برابر با ۲۵۹/۷ میلی‌متر می باشد. مقادیر حداقل و حداکثر آن مربوط به سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۰۲ میلادی با مقادیر به ترتیب ۶۳/۸۵ و ۸۸۸ میلی‌متر بوده است. در بین سال‌های مطالعاتی کمترین دمای حداکثر در ایستگاه اینچه‌برون مربوط به سال ۲۰۰۱ میلادی با دمای حداقل ۲۶/۲۳ درجه سانتی‌گراد و بالاترین دمای حداکثر مربوط به سال ۲۰۱۸ میلادی با دمای ۳۰/۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در بین سال‌های مطالعاتی کمترین دمای حداقل مربوط به سال ۲۰۱۹ میلادی با دمای ۶/۸۲ درجه سانتی‌گراد و بالاترین دمای حداقل مربوط به سال‌های ۲۰۱۲ میلادی با دمای ۹/۹۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. جدول ۲ شیب روند بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر را طی دوره پایه نشان می‌دهد. طبق این جدول و مطالب آماری ارائه شده در بالا، در دوره گذشته دما افزایش و بارش کاهش یافته است. همچنین شیب افزایش دمای حداکثر بیشتر از افزایش دمای حداقل می‌باشد.

جدول ۲- شیب روند دما و بارش سالانه در ایستگاه اینچه‌برون طی دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۰

Table 2- Annual temperature and rain trend slope at Inchebrun station during the period 2001-2020

پارامتر اقلیمی Climatic Parameter	بارش Rain	دمای حداکثر Maximum Temperature	دمای حداقل Minimum Temperature
شیب روندSlope Trend	-14.2	0.074	0.0098

نتایج اجرای مدل LARS-WG

جدول ۳ نتایج آزمون‌های Chi-square، T و F پارامترهای بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر را در ایستگاه اینچه‌برون نشان می‌دهد. سطح معناداری برای این آزمون‌ها ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. همچنین نتایج آزمون T در مورد بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر نشان می‌دهد که با اطمینان ۹۵٪ فرض صفر قابل قبول است. نتیجه آزمون F برای پارامتر بارش نشان می‌دهد که به جز ماه‌های آگوست و ژولای در بقیه ماه‌ها P-Value بزرگ‌تر از ۰/۰۵ بوده و فرض صفر مبنی بر برابری واریانس‌ها پذیرفته می شود. بنابراین نتیجه می‌گیریم که عملکرد مدل برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی دمای حداقل و حداکثر بسیار خوب است و در مورد بارش، عملکرد آن در حد قابل قبول است. زیرا با بررسی داده‌های مشاهداتی اصلی در منطقه، مشاهده می‌شود بارش در این دو ماه پراکندگی و تغییرات زیادی دارد.

جدول ۳- مقادیر آزمون‌های T و F محاسباتی توسط مدل LARS-WG در مرحله اعتبارسنجی در ایستگاه اینچه‌برون

Table 3- T and F test values calculated by the LARS-WG model in the validation phase at Inche- brun station

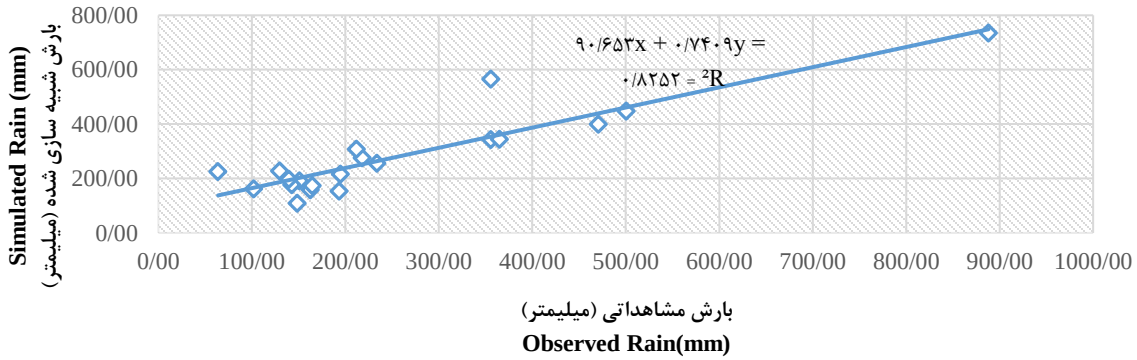
دمای حداکثر Maximum Temperature		دمای حداقل Minimum Temperature		بارش Rain		پارامترها Parameters
آزمون F F Test	آزمون T T Test	آزمون F F Test	آزمونT T Test	آزمون F F Test	آزمون T T Test	
9.115	0.923	9.317	0.934	1.393	0.323	January ژانویه
2.875	0.024	4.388	0.846	1.267	0.075	February فوریه
11.668	0.971	6.366	0415	1.887	0.747	March مارس
5.919	0.592	2.705	0.412	1.080	0.631	April آوریل
0.708	0.997	3.198	0.430	5.923	0.398	May می
3.308	0.708	6.013	0.769	5.139	0.238	June ژوئن
2.798	0.405	8.168	0.158	1.00	1.00	July جولای
1.629	0.660	12.18	0.911	1.00	1.00	August آگوست
2.468	0.162	4.275	0.227	9.445	0.0	September سپتامبر
14.748	0.220	14.106	0.314	5.664	0.032	Octobrاکتبر
4.153	0.558	6.182	0.008	2.276	0.18	Novemberنوامبر
0.0	7.254	4.521	0.580	1.951	0.562	Decemberدسامبر

با استفاده از آماره‌های ضریب تعیین (R)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) ، ارزیابی داده‌های تولید شده توسط مدل و داده‌های واقعی (مشاهده شده) موجود در دوره پایه، انجام شد. جدول ۴، نتایج ارزیابی داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل و داده‌های واقعی دوره پایه را نشان می‌دهد. چنانچه در جدول مشاهده می‌شود، مقدار ضریب تعیین در همه موارد از میزان قابل توجهی برخوردار می‌باشد. نزدیکی این مقدار به یک، دقت مدل را در شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

جدول ۴- مقادیر آماره‌های واسنجی جهت ارزیابی مدل LARS-WG در دوره پایه (۲۰۲۰-۲۰۰۱)

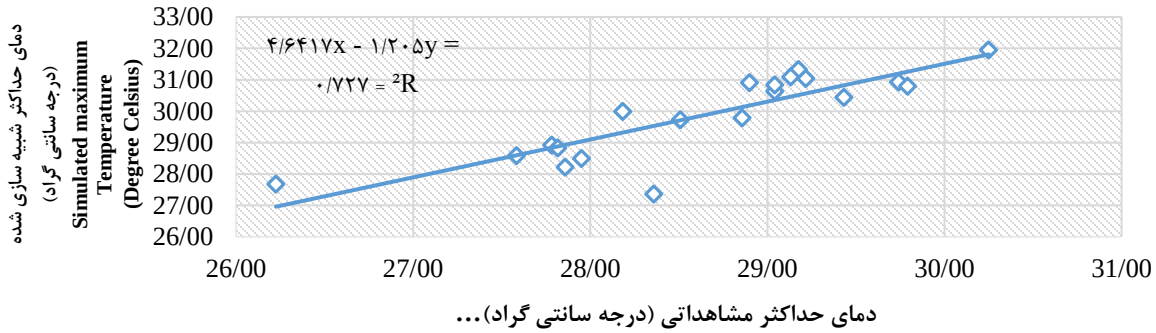
Table 4- Values of calibration statistics for evaluating the LARS-WG model in the base period (2001-2020)

دمای حداکثر (سانتیگراد) Maximum Temperatur (c)	دمای حداقل (سانتیگراد) Maximum Temperatur(c)	بارش (میلیمتر) Rain(mm)	پارامترهای آماری Statistical parameters
0.93	0.87	1.6	MAE
0.33	0.24	2.6	RMSE
0.8034	0.727	0.8252	R^2



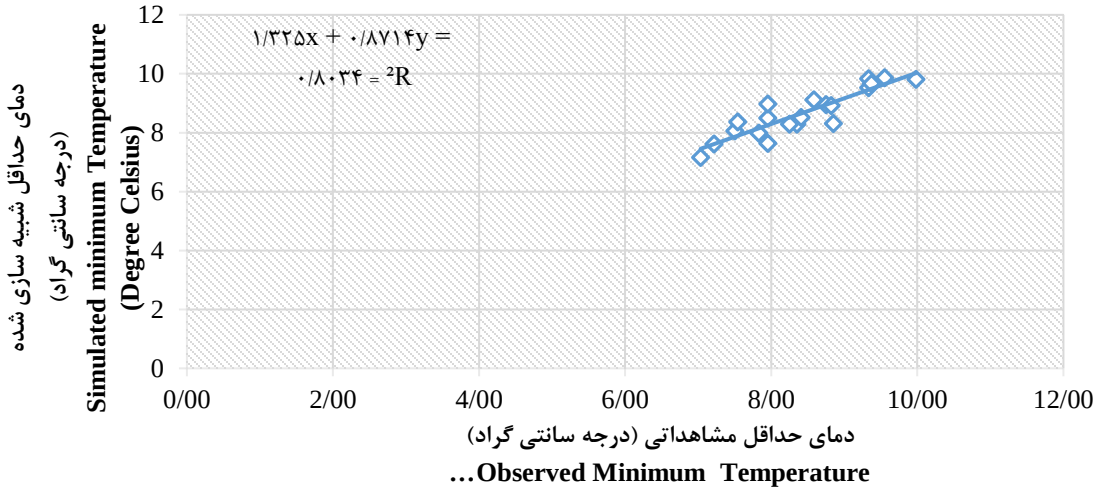
شکل ۳- مقایسه بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در ایستگاه اینچه‌برون

Fig.3. Comparison of observed and simulated rain at Inchebrun station



شکل ۴- مقایسه دمای حداکثر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در ایستگاه اینچه‌برون

Fig. 4. Comparison of observed and simulated maximum temperatures at Inche-brun station



شکل ۵- مقایسه دمای حداقل مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در ایستگاه اینچه‌برون

Fig. 5. Comparison of observed and simulated minimum temperatures at Inche-brun station

شکل‌های ۳ تا ۵ مقایسه داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مدل و داده‌های مشاهداتی در ایستگاه اینچه‌برون برای پارامترهای بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر را نشان می‌دهد. همان گونه که این نمودارها نشان می‌دهند مقادیر ضریب تعیین برای تمامی متغیرهای اقلیمی بالاست. همچنین مقادیر شاخص‌های خطاسنجی در جدول ۴ نیز نسبتا پایین می‌باشد که موید انطباق نسبی و قابل قبول مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقادیر مشاهده شده دوره پایه است.

نتایج ریز مقیاس کردن و تولید داده برای دوره آینده

همانطور که در جداول ۵ و۶ نشان داده شده است، تمامی سناریوها ، دمای بیشتری را در دوره آتی نسبت به دوره پایه تخمین می‌زنند. به طوری که انتظار می‌رود دمای منطقه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ بین ۰/۵ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش یابد. نتایج حاکی از افزایش دما در همه ماه‌ها برای تمامی سناریوهای اقلیمی می‌باشد. به طور کلی دمای سالانه نیز افزایش پیدا می‌کند و با توجه به اینکه سناریو A2 به عنوان بحرانی‌ترین سناریو محسوب می‌شود، بالاترین مقدار افزایش دما و سناریو B1 که سناریو خوشبینانه معرفی شده کمترین مقدار افزایش و سناریو A1B به عنوان سناریو میانه، افزایش دما در حد متوسط را نشان می‌دهد.

شکل‌های ۶ و ۷، روند تغییرات دمای حداکثر و حداقل را در دوره پایه و آتی تحت سه سناریو نشان می‌دهند. در این اشکال به خوبی نتایج ذکر شده قابل رویت می‌باشد. طبق نمودارهای بالا دمای حداقل و حداکثر در تمامی ماه‌های سال افزایش می‌یابد. افزایش دما با افزایش تبخیر و تعرق و تاثیرگذاری روی ذوب برف می‌تولند پیامدهای متعددی در بیلان آب تالاب‌های مورد مطالعه داشته باشد. طبق جدول۷، دما در تمامی ماه‌ها افزایش می‌یابد که بیشترین افزایش دما در سه سناریوی مورد بررسی در ماه آگوست یا اواسط تابستان می‌باشد و کمترین افزایش دما در ماه ژانویه یا اوایل زمستان می‌باشد. به طور کلی دمای حداکثر در سناریوی بدبینانه A2 حدود ۰/۸۹ درجه سانتی‌گراد و در سناریو خوشبینانه B1 حدود ۰/۷۱ درجه سانتی‌گراد در دوره آتی افزایش می‌یابد.

جدول ۵- مقادیر دمای حداکثر دوره پایه و دوره آینده تحت سه سناریو

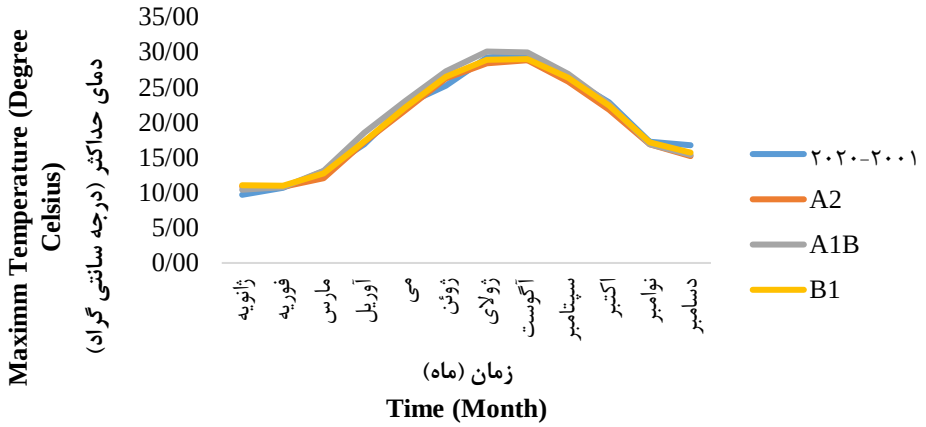
Table 5- Maximum temperature values for the base period and future period under three scenari**os**

دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ Period 2021-2050			دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۰ Period 2001-2020	ماه Month
B1	A1B	A2		
11.08	10.42	10.86	9.70	ژانویه January
11.00	10.78	10.84	10.69	فوریه February
12.75	13.11	12.08	13.05	مارس March
17.32	18.53	17.19	16.89	آوریل April
22.15	23.03	21.72	22.52	می May
26.51	27.28	26.29	25.25	ژوئن June
28.90	30.09	28.43	29.24	جولای July
29.02	29.99	28.86	29.77	آگوست August
26.36	26.94	25.82	26.37	سپتامبر September
22.40	22.63	21.82	22.88	اکتبر Octobr
17.18	16.87	16.88	17.25	نوامبر November
15.70	15.40	15.22	16.74	دسامبر December
20.03	20.42	19.67	20.03	سالانه Annual

جدول ۶- مقادیر دمای حداقل دوره پایه و دوره آینده تحت سه سناریو

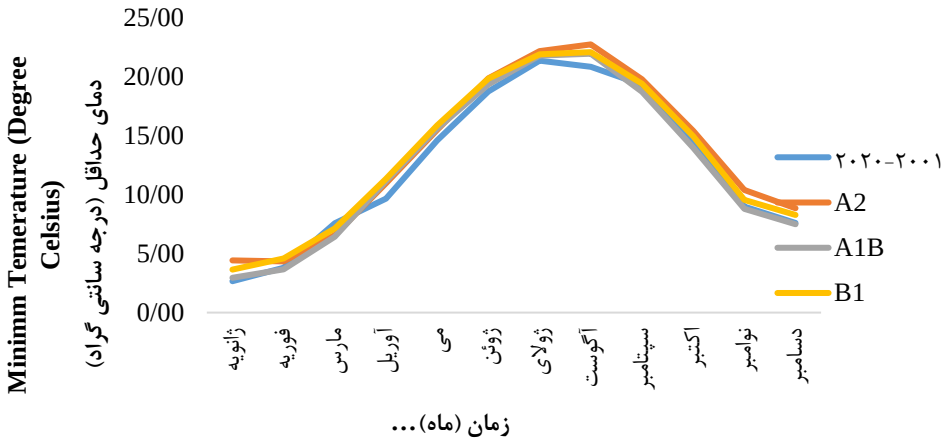
Table 6- Minimum temperature values for the base period and future period under three scenarios

دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ Period 2021-2050			دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۰ Period 2001-2020	ماه Month
B1	A1B	A2		
3.64	2.95	4.41	2.66	ژانویه January
4.58	3.67	4.34	3.81	فوریه February
7.14	6.43	6.57	7.56	مارس March
11.35	11.15	10.96	9.66	آوریل April
15.88	15.61	15.49	14.59	می May
19.84	19.35	19.87	18.76	ژوئن June
21.90	21.79	22.18	21.36	جولای July
22.08	21.95	22.74	20.83	آگوست August
19.40	18.73	19.80	19.31	سپتامبر September
14.94	13.98	15.42	14.51	اکتبر Octobr
9.54	8.80	10.40	8.99	نوامبر November
8.27	7.48	8.86	7.61	دسامبر December
13.21	12. 66	13.42	12.47	سالانه Annual



شکل ۶- دمای حداکثر دوره پایه و دوره آینده تحت سه سناریو

Fig. 6. Maximum temperature of the base period and future period under three scenarios



شکل ۷- دمای حداقل دوره پایه و دوره آینده تحت سه سناریو

Fig. 7. Minimum temperature of the base period and future period under three scenarios

جدول ۷-تغییرات ماهانه و سالانه دمای حداکثر برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نسبت به دوره مبنا تحت سناریوهای مختلف

Table 7- Monthly and annual changes in maximum temperature for the period 2021-2050 compared to the base period under different scenarios

دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ Period 2021-2050			ماه Month
B1	A1B	A2	
1.38	0.72	1.16	January ژانویه
1.30	1.08	1.14	February فوریه
3.05	3.41	2.38	March مارس
7.62	8.83	7.49	April آوریل
12.45	13.33	12.02	May می
16.81	17.58	16.59	June ژوئن

جولای July	18.73	20.39	19.20
آگوست August	19.16	20.29	19.32
سپتامبر September	16.12	17.24	16.66
اکتبر Octobr	12.12	12.93	12.70
نوامبر November	7.18	7.17	7.48
دسامبر December	5.52	5.70	6.00
سالانه Annual	9.97	10.72	10.33

طبق جدول ۸، دما در تمامی ماه‌ها افزایش می‌یابد که بیشترین افزایش دما در سه سناریوی مورد بررسی، در ماه آگوست یا اواسط تابستان می‌باشد و کمترین افزایش دما در سه سناریو، در ماه مارس یا اوایل بهار می‌باشد. به طور کلی دمای حداقل در سناریو بدبینانه A2 حدود ۰/۸۵ درجه سانتی‌گراد و در سناریو خوشبینانه B1 حدود ۱/۳ درجه سانتی‌گراد در دوره آتی افزایش می‌یابد. بنابراین طبق نتایج انتظار می‌رود بازخورد بارزی در بیلان آبی منطقه به دلیل کاهش پوشش برف در اثر افزایش دما و افزایش تبخیر به وجود آمده و همچنین پتانسیلی برای تغییر در وقایع جوی و هیدرولوژی تالاب آلاگل، آجی گل و آلماگل به وجود آید.

جدول ۸- تغییرات ماهانه و سالانه دمای حداقل برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نسبت به دوره مبنا تحت سناریوهای مختلف

Table 8- Monthly and annual changes in minimum temperatures for the period 2021-2050 compared to the base period under different scenarios

ژانویه Jan.	فوریه Feb.	مارس March	آوریل April	می May	ژوئن June	جولای July	آگوست Aug.	سپتامبر Sep.	اکتبر Oct.	نوامبر Nov.	دسامبر Dec.	سال Annual	
1.75	0.53	0.99	1.30	0.90	1.11	0.82	1.91	0.49	0.91	1.41	1.25	0.95	A2
0.29	0.14	1.13	1.49	1.02	0.59	0.43	1.12	0.58	0.53	0.19	0.13	0.19	A1B
0.98	0.77	0.42	1.69	1.29	1.08	0.54	1.25	0.09	0.43	0.55	0.66	0.74	B1

جدول ۹ نتایج تولید داده‌های بارندگی در ایستگاه اینچه‌برون توسط سه سناریو در دوره آتی و همچنین مقادیر این پارامتر را در دوره پایه نشان می‌دهد. بیشترین و کمترین بارش منطقه در دوره پایه به ترتیب در ماه مارس و آگوست با مقادیر ۹۴/۰۵ و ۳/۱۲ میلی‌متر می‌باشد. طبق نتایج جدول تمامی سناریوها کاهش بارندگی را در دوره آتی نسبت به دوره پایه تخمین می‌زنند.

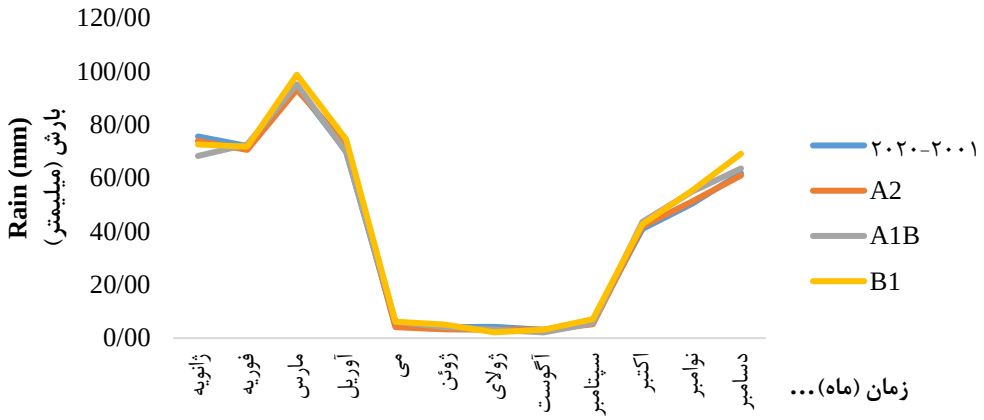
جدول ۹- مقادیر بارش در دوره پایه و دوره آینده تحت سه سناریو

Table 9- Precipitation values in the base period and future period under three scenarios

دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ Period 2021-2050			دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۰ Period 2001-2020	ماه Month
B1	A1B	A2		
72.57	68.31	73.96	75.54	ژانویهJanuary
71.74	72.62	70.58	71.99	فوریه February
98.72	95.08	93.12	94.05	مارس March
74.53	69.67	72.46	70.12	آوریل April
6.19	6.15	4.13	5.12	می May
5.04	4.18	3.29	4.16	ژوئن June
2.19	3.15	3.17	4.29	جولای July
3.11	2.15	3.21	3.12	آگوست August
7.13	5.61	5.18	6.35	سپتامبر September
42.78	43.56	41.85	40.93	اکتبر Octobr

نوامبر November	50.27	51.15	54.83	55.17
دسامبر December	61.74	60.91	63.57	69.12
سالانه Annual	40.64	40.25	40.74	42.36

طبق شکل ۸ در رفتار و الگوی بارش تغییراتی مشاهده می‌شود، به طوری که ماکزیمم بارش به انتهای فصل سرد جابه‌جا می‌شود، همچنین کاهش بارش در انتهای فصل پاییز و ابتدای فصل زمستان خطری جدی در اثر تغییر اقلیم برای منطقه می‌باشد.



شکل ۸- بارش شبیه‌سازی شده تحت سه سناریو و مشاهداتی در ایستگاه اینچه‌برون

Fig. 8. Simulated precipitation under three scenarios and observations at Inchebrun station

طبق جدول ۱۰ بارش در اکثر ماه‌ها کاهش پیدا کرده است. میزان بارندگی منطقه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ بین ۶ تا ۸ درصد نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. به طور کلی بارندگی سالانه نیز کاهش پیدا می‌کند و با توجه به اینکه سناریو A2 به عنوان بحرانی‌ترین سناریو محسوب می‌شود، بالاترین مقدار کاهش بارش و سناریو B1 که سناریو خوشبینانه معرفی شده کمترین مقدار کاهش و سناریو A1B به عنوان سناریو میانه کاهش بارش در حد متوسط را نشان می‌دهد. همچنین میزان کاهش باران در سناریو A2در ماه مارس بیش از سایر ماه‌ها و حدود ۷۵ درصد بوده و در سناریو B1 میزان بارش در ماه فوریه بیشتر از ماه‌های دیگر و حدود ۵۵ درصد کاهش یافته است. علاوه بر کاهش بارش که در اکثر ماه‌ها مشاهده می‌شود، در برخی ماه‌ها نیز شاهد افزایش بارش در دوره آتی هستیم. افزایش بارش در ماه‌های خشک سال معنادار نمی‌باشد.

جدول ۱۰- تغییرات ماهانه و سالانه بارش برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نسبت به دوره مبنا تحت سناریوهای مختلف

Table 10- Monthly and annual changes in precipitation for the period 2021-2050 compared to the base period under different scenarios

جولای July	آگوست August	سپتامبر September	اکتبر October	نوامبر November	دسامبر December	سال Annual	
-72.37	-72/33	-70.36	-33.69	-24.39	-14.63	-35.29	A2
-72.39	-73/39	-69.93	-31.98	-20.71	-97.11	-34.80	A1B
-73/35	-72.43	-68.41	-32.76	-20.37	-6.42	-33.18	B1

ژانویه January	فوریه February	مارس March	آوریل April	می May	ژوئن June	سال Annual	
-1.58	-4.96	-58.17	-3.08	-71.41	-72.25	-35.29	A2
-7.23	-2.92	-19.54	-5.87	-69.39	-71.36	-34.80	A1B
-2.97	-3.80	-23.18	-1.01	-69.35	-70.50	-33.18	B1

نقشه‌های کاربری اراضی

جهت تهیه نقشه‌های کاربری اراضی مربوط به سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۱۱ و ۲۰۲۰، ابتدا تصاویر به اندازه مرز منطقه برش داده شد و پس از انجام پیش پردازش های اولیه تصاویر، جهت حذف نویز و کاهش ابعاد داده‌ها از روش PCA (آنالیز مولفه‌های اصلی) استفاده شد. نتایج این آنالیز در تصویر لندست ۷ منجر به انتخاب باندهای ۱ تا ۴ و در لندست ۸ باندهای ۲ تا ۵ گردید. سپس مناطق تعلیمی جهت ورود به طبقه‌بندی با استفاده از الگوریتم حداکثر احتمال و نقشه‌های کاربری اراضی تهیه گردید. نقشه‌های حاصل از مرحله دوم با استفاده از نقاط کنترل زمینی مذکور ارزیابی صحت شدند و ضریب کاپای ۰/۹۱ برای نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۰۱ و ۲۰۱۱ و ۰/۹۲ برای سال ۲۰۲۰ به دست آمد (جدول ۱۱).

جدول ۱۱- نتایج صحت‌سنجی طبقه‌بندی کاربری اراضی

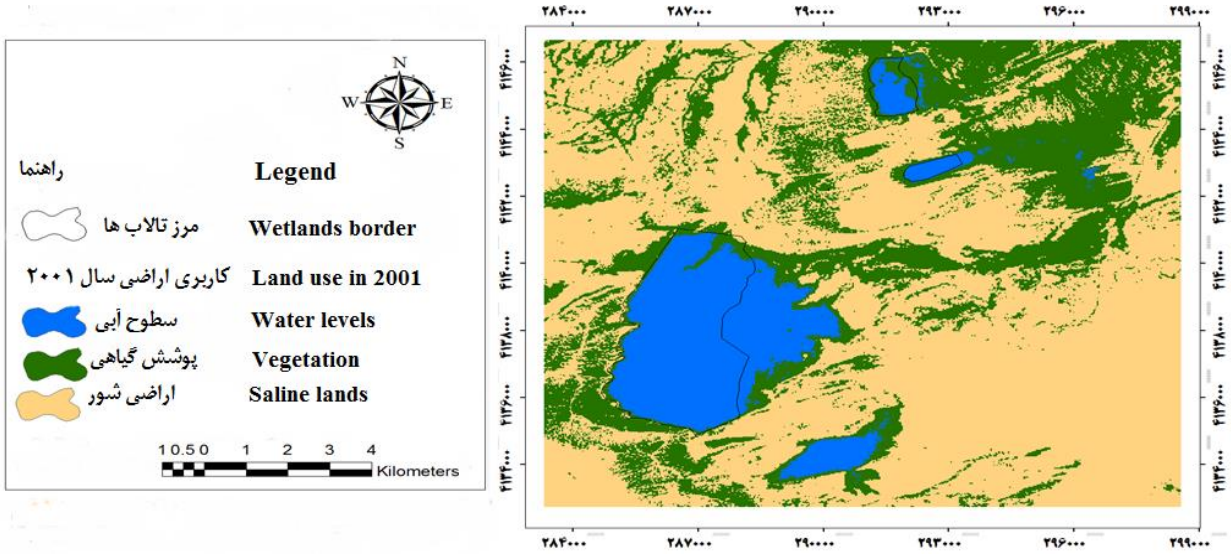
Table 11- Results of land use classification validation

2020	2011	2001	سال year
0.92	0.91	0.91	ضریب کاپا Kappa coefficient

کاربری اراضی تالاب‌های مورد مطالعه در طی سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۱۱ و ۲۰۲۰

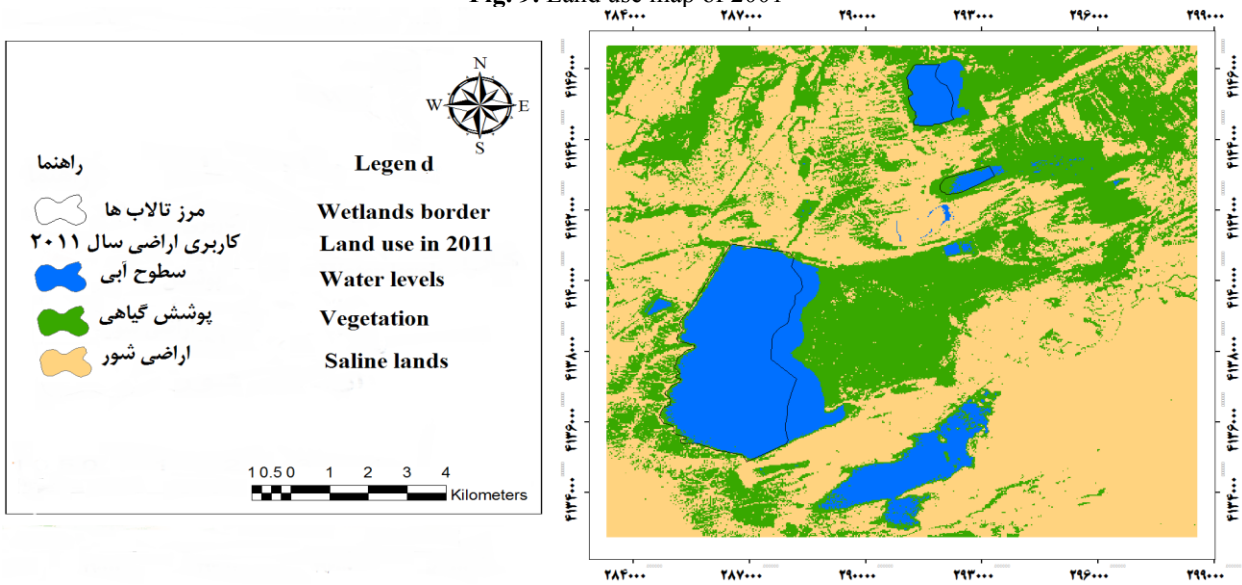
با توجه به شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ در طی سال ۲۰۰۱ کاربری زمین‌های شور ۱۲۸۰۱/۱۵ هکتار (۶۰/۳ درصد)، کاربری پوشش گیاهی با ۶۰۹۳/۱۸ هکتار (۲۸/۷ درصد) و کاربری سطوح آبی با ۲۳۱۹/۷۵ هکتار (۱۰/۹ درصد) بوده است. در سال ۲۰۱۱ نیز سطوح آبی افزایش تقریبا" ۱/۱ درصدی نسبت به سال ۲۰۰۱ داشته است و به ۲۵۴۹/۱۶ هکتار (۱۲ درصد) رسیده است. کاربری‌های پوشش گیاهی و زمین‌های شور به ترتیب با ۷۲۲۷/۹۹ هکتار (۳۴ درصد) و ۱۱۴۳۶/۹۳ هکتار (۵۴ درصد) از مساحت تالاب را به خود اختصاص دادند. نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۰ بیانگر آن است که در این سال مساحت سطوح آب با کاهش حدودا" ۲ درصد نسبت به دوره قبل ۲۲۲۵/۲۵ هکتار (۱۰/۴ درصد) بوده است. کاربری پوشش گیاهی با مساحت ۲۳۵۹/۰۸ هکتار (۱۱/۱ درصد) و کاربری زمین‌های شور با مساحت ۱۶۶۲۹/۷۵ هکتار (۷۸/۳ درصد) سطح تالاب‌ها را در بر گرفته‌اند. از نظر درصد مالکیت نیز اراضی شور بیشترین مقدار یعنی ۶۴/۲ درصد از مساحت اراضی را به خود اختصاص داده است. بعد از آن کاربری

پوشش گیاهی با ۲۴/۶ درصد و کاربری سطوح آبی با ۱۱/۱ درصد از مساحت کل تالاب‌ها، در رده‌های بعدی قرار دارند. جدول ۱۲ مساحت و درصد کاربری‌های مختلف را در سال‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



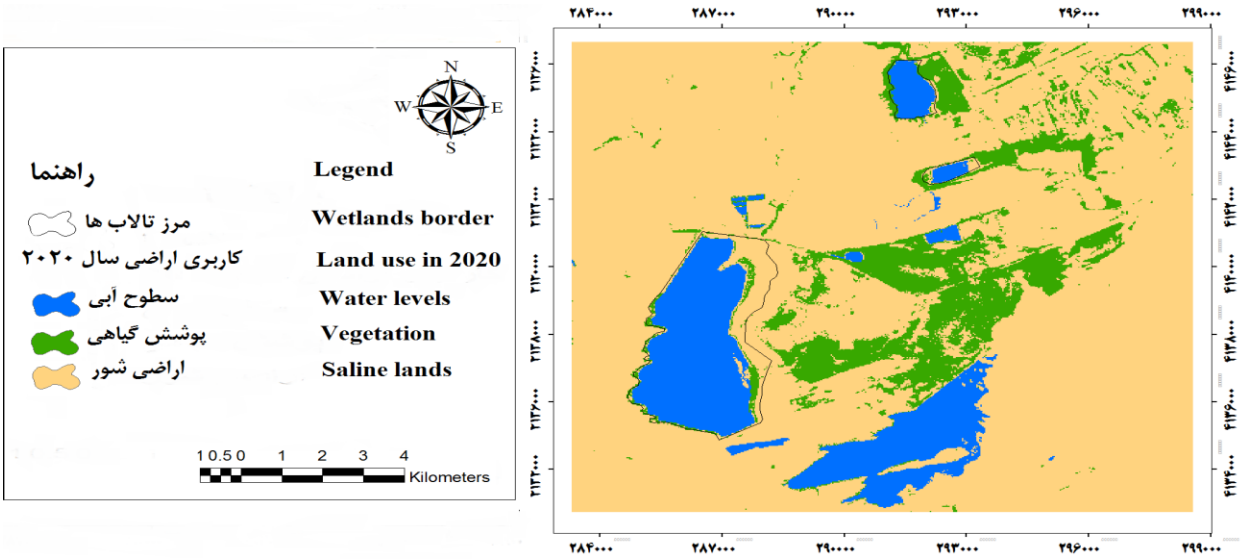
شکل ۹- نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۰۱

Fig. 9. Land use map of 2001



شکل ۱۰- نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۱

Fig. 10. Land use map of 2011



شکل ۱۱- نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۰

Fig. 11. Land use map of 2020

جدول ۱۲- مساحت و درصد کاربری‌ها به تفکیک دوره

Table 12- Area and percentage of land uses by period

سال	سطوح آبی Water Surfaces		پوشش گیاهی Vegetation		اراضی شور Saline Lands	
	مساحت (هکتار) Area(hectare)	درصد Percent	مساحت (هکتار) Area(hectare)	درصد Percent	مساحت (هکتار) Area(hectare)	درصد Percent
2001	2319.75	10.9	6093.18	28.7	12801.15	60.3
2011	2549.16	12	7227.99	34	11436.93	54
2020	2225.25	10.4	2359.08	11.1	16629.75	78.3

مدل‌سازی وپیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل CA-Marcov

بعد از تولید نقشه‌های کاربری برای سه سال ۲۰۰۱، ۲۰۱۱ و ۲۰۲۰، به منظور پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی برای دوره ۱۵ سال بعدی یعنی سال ۲۰۳۵ از تحلیل زنجیره مارکوف استفاده می‌شود. پیش بینی تغییرات با استفاده از تحلیل زنجیره مارکوف، به طورکلی بر وضعیت کاربری زمین در سال ۲۰۲۰ و تغییرات کاربری زمین در دوره ۲۰ سال قبلی بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ متکی است. بعد از اجرای تحلیل زنجیره مارکوف با خطای نسبی ۱/ ۰(بدان معنی که بیشتر نقشه‌های کاربری زمین دارای دقت ۹۰ درصد هستند). بر روی دو نقشه کاربری اراضی به دست آمده از طبقه بندی تصاویر ماهواره‌ای، یک ماتریس احتمال انتقال و یک ماتریس مساحت انتقال یافته ایجاد شد (جداول ۱۳ و ۱۴). در هر دو جدول مذکور ماتریس احتمال انتقال، احتمال انتقال هر کدام از کاربری‌ها به کاربری دیگر را نشان می‌دهد. این ماتریس نتیجه جدول حاصل از تطابق نقشه‌های دو تصویر است که توسط خطای نسبی اصلاح شده است.

جدول ۱۳- ماتریس مساحت احتمال انتقال

Table 13- Transition probability area matrix

کاربری Usage	سطوح آبی Water Surfaces	پوشش گیاهی Vegetation	اراضی شور Saline Lands
سطوح آبی Water Surfaces	17006	2389	5330
پوشش گیاهی Vegetation	973	6508	18732
اراضی شور Saline Lands	6132	11859	166784

جدول ۱۴- ماتریس احتمال انتقال

Table 14- Transmission probability matrix

کاربری Usage	سطوح آبی Water Surfaces	پوشش گیاهی Vegetation	اراضی شور Saline Lands
سطوح آبی Water Surfaces	0.68	0.09	0.21
پوشش گیاهی Vegetation	0.03	0.24	0.71
اراضی شور Saline Lands	0.03	0.06	0.9

پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل CA-Markov

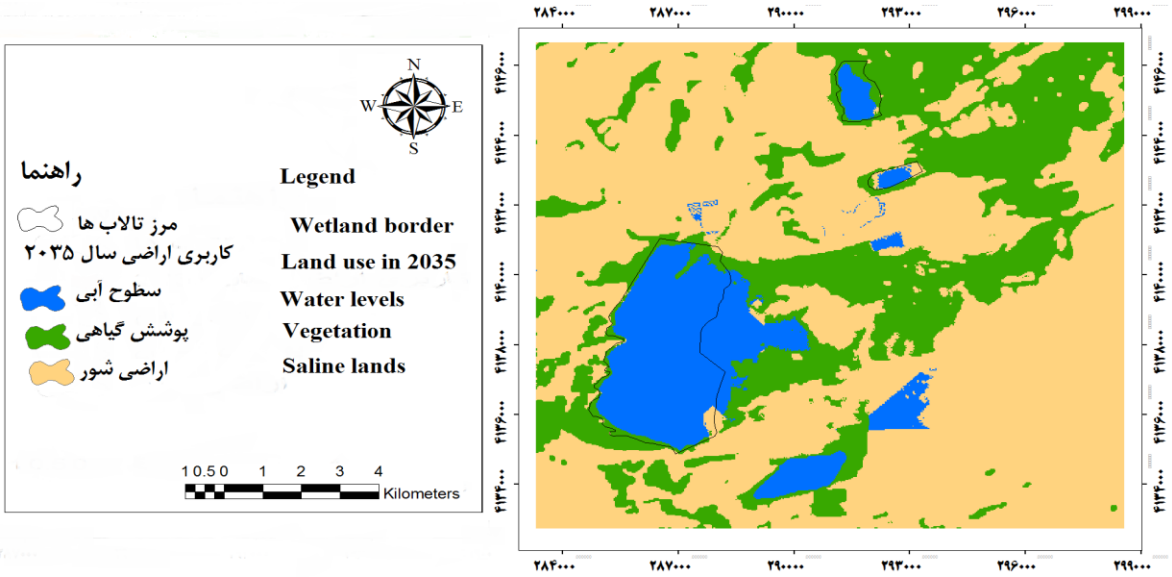
با مبنا قرار دادن نقشه کاربری اراضی تالاب‌های مورد مطالعه در سال ۲۰۰۱ و با استفاده از ماتریس مساحت انتقال یافته (جدول ۱۴) به دست آمده از تحلیل زنجیره مارکوف، تغییرات کاربری اراضی برای دوره ۱۵ سال آینده یعنی سال ۲۰۳۵ پیش‌بینی شد (شکل ۱۲). همچنین مساحت طبقات کاربری اراضی در سال‌های پیش‌بینی شده در تالاب‌های آلاگل، آجی گل و آلماگل در جدول ۱۵ نشان داده شده است.

همین طور که در جدول ۱۵ مشاهده می‌شود در طی سال ۲۰۳۵ کاربری زمین‌های شور ۱۳۳۴۶/۵۵ هکتار (۶۳ درصد) خواهد بود. سایر کاربری‌ها نیز به ترتیب کاربری پوشش گیاهی با ۵۶۰۱/۷۸ هکتار (۲۶/۴ درصد) و کاربری سطوح آبی با ۲۲۶۵/۷۵ هکتار (۱۰/۶ درصد) در رده‌های بعدی قرار دارند. همچنین شکل ۱۳ نمودار درصد مساحت کاربری‌ها را در سال‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۱۵- مساحت و درصد کاربری‌ها در سال ۲۰۳۵

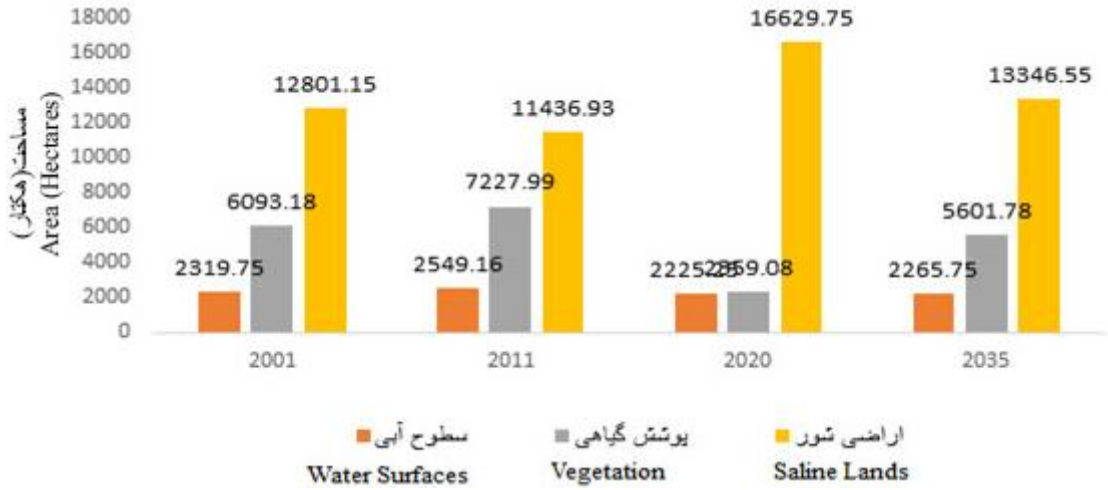
Table 15- Area and percentage of land uses in 2035

کاربری Usage	Year: ۲۰۳۵	
	مساحت (کیلومترمربع) Area (square kilometer)	درصد Percent
سطوح آبی Water Surfaces	2226.75	10.6
پوشش گیاهی Vegetation	5601.78	26.4
اراضی شور Saline Lands	13346.55	62.9
مجموع Total	21214.08	100



شکل ۱۲- نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۳۵

Fig. 12. Land use map of 2035



شکل ۱۳- نمودار درصد مساحت کاربری‌های تالاب‌های آلاگل،آلماگل وآجی گل در سال‌های مورد مطالعه

Fig. 13. Percentage of area used by Alagol, Almagol, and Ajigol wetlands in the years studied

طبق جدول ۱۶ در سال ۲۰۰۱ مساحت تالاب آلاگل ۱۹۲۲/۳۰ هکتار بوده است. تالاب‌های آلماگل و آجی‌گل با ۱۰۳/۹۰ هکتار و ۷۳ هکتار در رده‌های بعدی قرار دارند. در سال ۲۰۱۱ نیز مساحت تالاب آلاگل با کاهش تقریبا ۱۶۵ هکتاری نسبت به دوره قبل به ۱۷۵۸ هکتار و تالاب آجی‌گل با کاهش ۲۸ هکتاری به ۴۵ هکتار رسیده است. در صورتی تالاب آلماگل با افزایش حدودا" ۱۱۵ هکتاری به ۲۱۷ هکتار در این سال رسیده است. در سال ۲۰۲۰ مساحت تالاب آلاگل با کاهش تقریبا ۶۳۰ هکتاری نسبت به ماقبل خود به ۱۱۳۰/۱۵ هکتار می‌رسد. تالاب‌های آلماگل و آجی‌گل به ترتیب با مساحت ۱۳۷/۳۰ هکتار و ۳۶/۸۰ هکتار از سطح تالاب‌ها را به خود اختصاص دادند. در سال ۲۰۳۵ نیز مساحت تالاب‌های آلاگل، آلماگل و آجی به ترتیب به ۱۷۴۷/۵۰ هکتار، ۱۰۲/۳۰ هکتار و ۳۳/۹۰ هکتار خواهد رسید.

جدول ۱۶- مساحت تالاب‌های آلاگل، آلماگل و آجی‌گل در دوره‌های مورد مطالعه

Table 16- Area of Alagol, Almagol and Ajigol wetlands in the studied periods

سال Year	تالاب Wetland	مساحت (هکتار) Area (hectare)
2001	آلاگل Alagol	1922.30
	آلماگل Almagol	103.90
	آجی‌گل Ajigol	73
2011	آلاگل Alagol	1758
	آلماگل Almagol	217.20
	آجی‌گل Ajigol	45.10
2020	آلاگل Alagol	1130.15
	آلماگل Almagol	137.30
	آجی گل Ajigol	36.80
2035	آلاگل Alagol	1747.50
	آلماگل Almagol	102.30
	آجی گلAjigol	23.90

مشخصه‌سازی ریسک‌های محیط زیستی اکولوژیکی ناشی از تغییر اقلیم در تالاب‌ها

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل ریسک‌ها بر اساس شاخص‌های شدت اثر، احتمال وقوع و دامنه در جدول ۱۷ به صورت میزان ریسک‌های ناشی از تغییر اقلیم نشان داده شده است. روش ارزیابی ریسک در این تحقیق تلفیقی از روش عمومی ریسک، روش ویلیام فاین و روش ارزیابی ریسک با استفاده از ابزارهای سنجش از دور (RS) و همچنین خروجی‌های مدل تغییر اقلیم (GCM) می‌باشد. پیامدهای ناشی از اثرات بالقوه عوامل ریسک از طریق تصاویر ماهواره‌ای، مدل‌سازی تغییر اقلیم، محاسبه شاخص خشکسالی، همچنین بررسی عملکردهای اصلی تالاب بعد از مواجهه با این تهدیدات تعیین شده و دامنه این اثرات از طریق ارزیابی دریافت کننده‌های ریسک و همچنین چگونگی مواجهه با آنها محاسبه شده است. با توجه به اینکه نتایج حاصل از مدل‌سازی تغییر اقلیم، در سه سناریو بررسی گردید، ریسک‌ها نیز در سه سناریو و همچنین وضعیت موجود آورده شده است.

اولویت‌بندی ریسک‌های محیط زیستی تالاب‌های آجی‌گل، آلاگل و آلماگل

برای مقایسه ریسک‌های اکولوژیکی با منشا طبیعی (در اثر تغییرات اقلیمی) با ریسک‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی به منظور وزن‌دهی به گزینه‌های ریسک و همچنین شاخص‌های موثر برآورد سطح ریسک از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و نرم‌افزار Expert Choice بهره‌گیری شد. بر اساس مقایسه درجه اهمیت انواع ریسک‌های اکولوژیکی با منشا طبیعی در اثر تغییرات اقلیمی در تالاب‌های مورد مطالعه با ریسک‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی نشان از آن دارد که اهمیت بالایی برای ریسک‌های اکولوژیکی وجود دارد. هر دو نوع ریسک تقریبا نیمی از ریسک‌های موجود را تشکیل می‌دهند (شکل ۱۴).

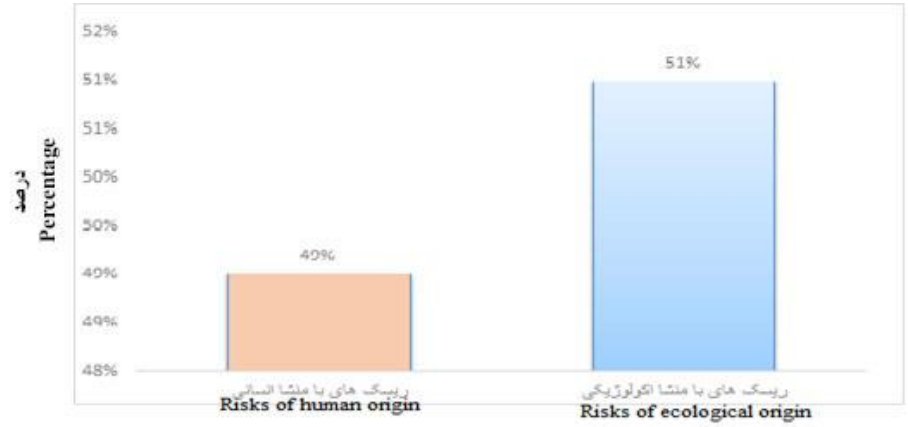
جدول ۱۷- محاسبه میزان ریسک‌های ناشی از تغییر اقلیم در تالاب‌های آلاگل، آجی‌گل و آلماگل

Table 17- Calculation of the risks from climate change in Alagol, Ajigol and Almagol wetlands

ارزیابی ریسک بر اساس سناریو A1B Risk assessment based on scenario A1B				ارزیابی ریسک بر اساس وضع موجود Risk assessment based on the current situation				ارزیابی ریسک Risk assessment
RPN	دامنه Range	شدت Severity	احتمال Probability	RPN	دامنه Range	شدت Severity	احتمال Probability	ریسک محیط‌زیستی Environmental risks
96	6	4	4	96	6	4	4	فرسایش خاک Soil erosion
192	6	8	4	192	6	8	4	شور شدن آب تالاب Wetland salinization
216	6	6	6	144	6	6	4	از دست رفتن ذخایر ژنتیک Loss of genetic resources
144	4	6	6	144	4	6	6	افزایش آلاینده‌های زنده و غیر زنده Increase in biotic and abiotic pollutants
288	6	6	8	216	6	6	6	افزایش تبخیر و تعرق Increasing evapotranspiration
288	8	6	6	192	8	6	4	رسوب و پر شدن Sedimentation and filling
384	6	8	8	288	6	8	6	از بین رفتن زیستگاه Habitat loss
384	6	8	8	388	6	8	6	تغییر در جریان رژیم Change in flow regime
640	8	10	8	480	8	10	6	خشکسالی/ وقوع کم آب Drought/water stress
8	2	2	2	16	2	4	2	سیل Flooding
ارزیابی ریسک بر اساس سناریو A2 Risk assessment based on scenario A2				ارزیابی ریسک بر اساس سناریو B1 Risk assessment based on scenario B1				ارزیابی ریسک Risk assessment
RPN	دامنه Range	شدت Severity	احتمال Probability	RPN	دامنه Range	شدت Severity	احتمال Probability	ریسک محیط‌زیستی Environmental risks
۱۹۲	۶	4	8	144	6	4	6	فرسایش خاک Soil erosion
۳۸۴	۶	8	8	188	6	8	6	شور شدن آب تالاب Wetland salinization
۲۸۸	۶	6	8	288	6	6	8	از دست رفتن ذخایر ژنتیک Loss of genetic resources
۲۱۶	6	6	6	216	6	6	6	افزایش آلاینده‌های زنده و غیر زنده Increase in biotic and abiotic pollutants
360	6	6	10	288	6	6	8	افزایش تبخیر و تعرق Increasing evapotranspiration
480	8	6	10	384	8	6	8	رسوب و پر شدن Sedimentation and filling
360	6	6	10	288	6	6	8	از بین رفتن زیستگاه Habitat loss
480	6	8	10	384	6	8	8	تغییر در جریان رژیم Change in flow regime

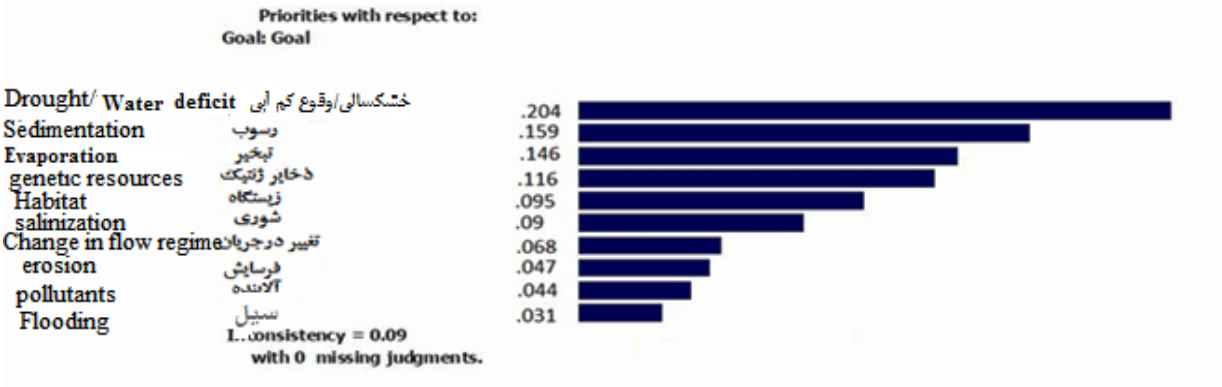
خشکسالی/ وقوع کم آب Drought/water stress	10	10	8	800	10	10	8	800
سیل Flooding	1	2	2	4	1	1	1	1

با توجه به شکل ۱۵ بیشترین وزن در بین این ریسک‌ها مربوط به خشکسالی برابر با ۰/۱۹ می باشد. همچنین مجموع وزن ۵ ریسک با منشا اکولوژیکی، ۵۱٪ و مجموع وزن ۵ ریسک با منشا انسانی، ۴۹٪ از کل را به خود اختصاص دادند.



شکل ۱۴-مقایسه ارجحیت انواع ریسک‌های تهدید کننده تالاب‌های آلاگل، آجی‌گل و آلماگل

Fig.14. Comparison of the priority of the types of risks threatening the Alagol, Ajigol and Almagol wetlands



شکل ۱۵- وزن‌های حاصل از روش سلسله مراتبی در مورد ریسک‌های مهم تالاب‌های مورد مطالعه

Fig.15. Weights resulting from the hierarchical method for important risks of the studied wetlands

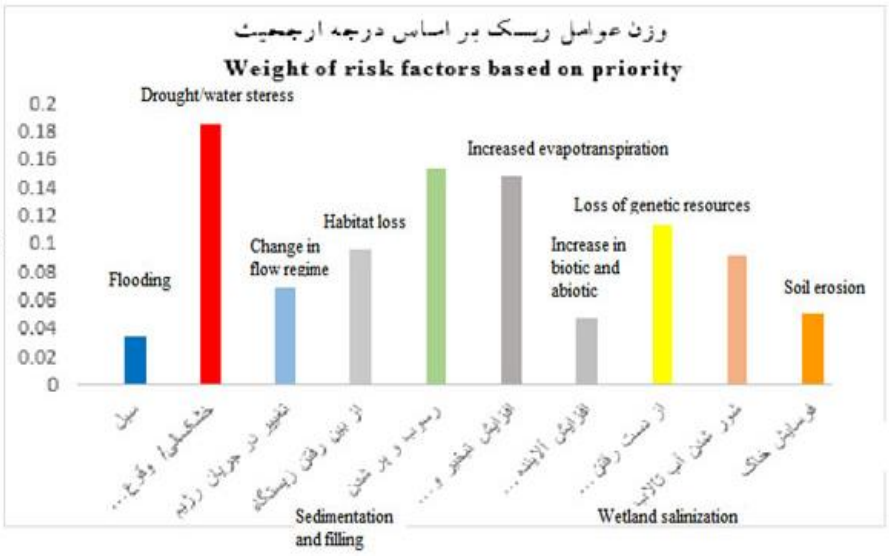
اولویت‌بندی ریسک‌های اکولوژیکی ناشی از تغییر اقلیم تالاب‌های آجی‌گل، آلاگل و آلماگل

به منظور وزن‌دهی به گزینه‌های ریسک‌های ناشی از تغییر اقلیم، از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و نرم‌افزار Expert Choice بهره‌گیری شد. بدین منظور ساختار سلسله مراتبی ریسک‌های مطرح برای تالاب با توجه به شاخص‌های احتمال وقوع، شدت اثر و دامنه اثر تهیه و معیارها و گزینه‌های ریسک وزن‌دهی شد.

جدول ۱۸- اولویت‌بندی عوامل ریسک‌های اکولوژیکی ناشی از تغییر اقلیم سه تالاب به روش AHP

Table 18 - Prioritization of ecological risk factors resulting from climate change in three wetlands using the AHP method

ردیف	ریسک	Risk	وزن Weight
1	خشکسالی/وقوع کم آبی	Drought/water steress	0.20
2	رسوب و پر شدن	Sedimentation and filling	0.15
3	افزایش تبخیر و تعرق	Increased evapotranspiration	0.14
4	از دست رفتن ذخایر ژنتیک	Loss of genetic resources	0.11
5	از بین رفتن زیستگاه	Habitat loss	0.95
6	شور شدن آب تالاب	Wetland salinization	0.90
7	تغییر در جریان رژیم	Change in flow regime	0.68
8	فرسایش خاک	Soil erosion	0.47
9	افزایش آلاینده های زنده و غیر زنده	Increase in biotic and abiotic pollutants	0.44
10	سیل	Flooding	0.31



شکل ۱۶- محاسبه میزان ریسک‌های ناشی از تغییر اقلیم در تالاب‌های آلاگل، آجی‌گل و آلماگل

Fig. 16. Calculating the risks from climate change in Alagol, Ajigol and Almagol wetlands

شناسایی ریسک‌های اقلیمی تالاب‌های آجی گل، آلاگل و آلماگل

ریسک‌های اقلیمی به احتمال رخداد خطر یا نتایج از دست رفتن قابل انتظار تعامل خطرات اقلیمی در شرایط آسیب پذیر اشاره دارد. خطرات اقلیمی به پتانسیل تخریب حوادث هیدرومترولوژیکی یا پدیده اشاره دارد که می‌تواند توسط مکان، شدت، فراوانی، مدت و احتمال وقوع مشخص می‌گردد. برای این هدف، حوادث با شروع و اتمام قابل شناسایی، مانند دما و قابل ملاحظه هستند. خطرات، تهدیدات و استرس‌های ناشی از تغییر اقلیم بر تالاب‌های آجی‌گل، آلاگل و آلماگل با توجه به شرایط اکولوژیکی تالاب‌ها از طریق بازدیدهای میدانی، مصاحبه با کارشناسان و مطالعات مشابه مورد بررسی قرار گرفتند که ۱۰ ریسک مهم شناسایی گردید. می‌توان بیان کرد که تمامی این ریسک‌ها از پیش وجود داشته و در شرایط تغییر اقلیم تشدید می‌گردند.

بر طبق نتایج از حاصل اولویت‌بندی عوامل ریسک به کمک فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (جدول ۱۸) و (شکل ۱۶) خشکسالی، رسوب و پر شدن، افزایش تبخیر و تعرق بیشترین وزن را به خود اختصاص دادند. در جدول ۱۹ ریسک‌های اکولوژیکی شناسایی و میزان ریسک وزن‌دار شده، آورده شده است.

جدول ۱۹- ریسک‌های اکولوژیکی ناشی از تغییر اقلیم در تالاب‌های مورد مطالعه بر اساس میزان ریسک وزن‌دار

Table 19- Ecological risks caused by climate change in the studied wetlands based on the weighted risk level

ردیف	وضع موجود Existing condition	وزن Weight	A1B	حاصل ضرب Product	وزن Weight	B1	حاصل ضرب Product	وزن Weight	A2	حاصل ضرب Product
فرسایش خاک Soil erosion	96	0.04	96	4.51	0.47	144	4.512	0.47	192	7.76	9.02
شور شدن تالاب Wetland salinization	192	0.09	192	17.28	0.90	288	17.28	0.90	384	92.25	34.56
از دست رفتن ذخایر ژنتیک Loss of genetic resources	144	0.11	216	16.70	0.11	288	25.05	0.166	288	33.40	33.40
افزایش آلاینده‌های زنده و غیرزنده Increase in biotic and abiotic pollutants	144	0.04	144	6.33	0.44	216	63.36	0.44	216	95.04	95.04
افزایش تبخیر و تعرق Increase in evapotranspiration	216	0.14	288	31.53	0.14	288	42.03	0.14	360	42.04	52.56
رسوب و پر شدن Sedimentation and filling	192	0.15	288	30.52	0.15	384	45.97	0.15	480	61.05	76.32
از بین رفتن زیستگاه Habitat loss	288	0.90	384	27.36	0.95	288	36.48	0.95	360	27.36	34.20
تغییر در جریان رژیم Change in flow regime	288	0.06	384	19.58	0.68	384	26.11	0.68	480	26.11	32.64
خشکسالی/ وقوع کم آبی Drought/water steress	480	0.20	640	97.92	0.20	800	130.56	0.20	800	163.20	163.20
سیل Flooding	16	0.03	8	4.96	0.31	4	2.48	0.31	1	1.24	0.31

جدول ۲۰- اولویت‌بندی ریسک‌های اکولوژیکی ناشی از تغییر اقلیم بر اساس میزان ریسک وزن‌دار شده

Table 20 - Prioritization of ecological risks from climate change based on weighted risk

طبقه ریسک Risk Class	اولویت ریسک Risk Priority	حاصلضرب Product	وزن Weight	وضع موجود RPN	
کم Low	10	4.51	0.047	96	فرسایش خاک Soil erosion
کم Low	6	17.28	0.090	192	شور شدن آب تالاب Wetland salinization
کم Low	7	16.70	0.116	144	از دست رفتن ذخایر ژنتیک Loss of genetic resources
زیاد High	8	6.33	0.044	144	افزایش آلاینده‌های زنده و غیر زنده Increase in biotic and abiotic pollutants
متوسط Average	2	31.53	0.146	216	افزایش تبخیر و تعرق Increase in evapotranspiration
متوسط Average	3	30.52	0.159	192	رسوب و پر شدن Sedimentation and filling
متوسط Average	4	27.36	0.095	288	از بین رفتن زیستگاه Loss of genetic resources
متوسط Average	5	19.58	0.068	288	تغییر در جریان رژیم Change in flow regime
خیلی زیاد Very high	1	97.93	0.204	480	خشکسالی/ وقوع کم آبی Drought/water steress
کم Low	9	4.96	0.031	16	سیل Flooding

نتایج حاصل از اولویت‌بندی ریسک‌ها جدول ۲۰ نشان می‌دهد که مهم‌ترین ریسک‌های تهدید کننده این تالاب‌ها ناشی از تغییرات اقلیمی شامل: خشکسالی، وقوع کم آبی، افزایش تبخیر و تعرق، رسوب و پر شدن و از بین رفتن زیستگاه می‌باشد. با توجه به اینکه سطح مهمترین ریسک‌ها در طبقه‌بندی زیاد، متوسط می‌باشد، براساس اصل ALARP باید نسبت به کنترل، حذف یا کاهش ریسک‌ها اقدام نمود (جدول ۲۱). ریسک‌هایی که دارای احتمال وقوع، شدت اثر و دامنه اثر بیشتری هستند، بیشتر از لحاظ اقدامات کنترلی مورد توجه قرار گیرند. این بدان معنی نیست که سایر ریسک‌ها دارای مقدار کمتری هستند، از این الزامات کنترلی بی‌نیاز می‌باشند. چرا که امتیاز نهایی این ریسک‌ها از تلفیق این ۳ شاخص به وجود آمده است

جدول ۲۱- برنامه مدیریت ریسک‌های محیط زیستی ناشی از تغییر اقلیم در تالاب‌های مورد مطالعه

Table 21- Environmental risk management plan due to climate change in the studied wetlands

ریسک‌های محیط زیستی Environmental risks	سطوح ریسک Risk levels		راهکارهای مدیریتی Management solutions
	طبقه Class	اولویت ریسک Risk priority	
خشکسالی/ وقوع کم آبی Drought/water stress	خیلی زیاد Very high	1	طراحی شبکه پایش خشکسالی در حوضه آبریز Designing a drought monitoring network in the watershed محاسبه و تخصیص حق آبه زیست محیطی تالاب‌ها Calculation and allocation of environmental water rights for wetland
افزایش تبخیر و تعرق Increase in Evapotranspiration	متوسط Average	2	کاشتن درخت و درختچه برای ایجاد سایه Planting trees and shrubs to create shade جلوگیری از تخریب پوشش گیاهی موجود در نهرها و جویبارهای منتهی به تالاب Preventing the degradation of vegetation in streams and brooks leading to the wetland.
رسوب و پر شدن Sedimentation and filling	متوسط Average	3	جلوگیری از جنگل‌زدایی و حفاظت خاک در بالادست تالاب Preventing deforestation and protecting soil upstream of the wetland تخلیه رسوبات با در نظر گرفتن کلیه آیتم‌های زیستی و زیستگاهی Discharge of sediments, taking into account all biological and habitat items.
از بین رفتن زیستگاه Habitat loss	متوسط Average	4	اجتناب یا به حداقل رساندن اختلال در مناطق تالابی مشخص Avoid or minimize disturbance to designated wetland are تخصیص حداقل حق آبه مورد نیاز برای تالاب Allocation of the minimum required water rights for the wetland
تغییر در جریان رژیم Change in flow regime	متوسط Average	5	محدود کردن بهره برداری غیرمجاز از منابع آبی، بخصوص در دوره های خشکسالی Limiting unauthorized exploitation of water resources, especially during periods of drought.
شور شدن آب تالاب Wetland salinization	کم Low	6	معرفی گیاهان شور پسند Introduction to salt-loving plants انتقال زهاب‌های شور مجتمع‌های کشت و صنعت به عمق ۶ متری Transferring saline drainage from agricultural and industrial complexes to a depth of 6 meters
از دست رفتن ذخایر ژنتیک Loss of genetic resources	کم Low	7	جلوگیری از ورود انواع فاضلاب‌های صنعتی، شهری و کشاورزی Preventing the entry of all types of industrial, urban and agricultural wastewater
افزایش آلاینده‌های زنده و غیر زنده Increase in biotic and abiotic	کم Low	8	جلوگیری از ورود انواع آلودگی‌ها به آب تالاب و جلوگیری از تصرف و تغییر کاربری از طریق تعیین حریم و علامت‌گذاری محدوده تالاب Preventing all types of pollution from entering the wetland water and preventing occupation and change of use by determining the boundaries and marking the wetland area.
سیل Flooding	کم Low	9	شناسایی نقاط حساس و بکارگیری روش‌های مدیریتی ساده و کاربردی بخصوص جهت پیش بینی سیل Identifying sensitive points and applying simple and practical management methods, especially for flood prediction. بررسی دوره‌های بازگشت سیل در حوضه Investigating flood return periods in the basin
فرسایش خاک Soil erosion	کم Low	10	تشویق به جنگل‌کاری و/یا فعالیت‌های حفاظت از خاک در مناطق بالادست Encourage afforestation and/or soil conservation activities in upstream areas

نتیجه‌گیری

تغییرات آینده بر اساس سناریوهای اقلیمی و نتایج حاصل از خروجی‌های مدل گردش عمومی جو حاکی از افزایش دمای حداکثر و دمای حداقل در تمام ماه‌های سال است. اما به طورکلی بارش متوسط در اغلب ماه‌ها روند و الگوی منظمی نداشته و آزمون‌های همگنی نیز این موضوع را تأیید کردند. به همین خاطر نمی‌توان به طورقطع در مورد تغییرات پارامتر بارش اظهارنظر کرد. سری‌های بارش در ایستگاه اینچه‌برون با روند کاهش تقریبی همراه بود. نتایج حاصل از اولویت‌بندی ریسک‌ها نشان می‌دهد که مهم‌ترین ریسک‌های تهدید کننده تالاب‌های آلاگل، آجی‌گل و آلماگل ناشی از تغییرات اقلیمی به ترتیب اولویت خشکسالی/وقوع کم آبی، افزایش تبخیر و تعرق، رسوب و پر شدن و از بین رفتن زیستگاه می‌باشد.

با توجه به طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای در طی سال ۲۰۰۱ مساحت تالاب آلاگل ۱۹۲۲/۳۰ هکتار بوده است. تالاب‌های آلماگل و آجی‌گل با ۱۰۳/۹۰ و ۷۳ هکتار در رده‌های بعدی قرار دارند. در سال ۲۰۱۱ نیز مساحت تالاب آلاگل با کاهش تقریبا ۱۶۵ هکتاری نسبت به دوره قبل به ۱۷۵۸ هکتار و تالاب آجی‌گل با کاهش ۲۸ هکتاری به ۴۵ هکتار رسیده است. در صورتی تالاب آلماگل با افزایش حدودا" ۱۱۵ هکتاری به ۲۱۷ هکتار در این سال رسیده است. همچنین در سال ۲۰۲۰ مساحت تالاب آلاگل با کاهش تقریبا ۶۳۰ هکتاری نسبت به ماقبل خود به ۱۱۳۰/۱۵ هکتار می‌رسد. تالاب‌های آلماگل و آجی‌گل به ترتیب با مساحت ۱۳۷/۳۰ هکتار و ۳۶/۸۰ هکتار از سطح تالاب‌ها را به خود اختصاص دادند. در سال ۲۰۳۵ نیز مساحت تالاب‌های آلاگل، آلماگل و آجی به ترتیب به ۱۷۴۷/۵۰ هکتار، ۱۰۲/۳۰ هکتار و ۳۳/۹۰ هکتار خواهد رسید که نشان دهنده کاهش در تالاب‌های آلماگل و آجی‌گل است البته در تالاب آلاگل وضعیت کمی فرق می‌کند و افزایش را نشان می‌دهد به طوری که این افزایش نسبت به دوره‌های قبل است ولی بطوری کلی از میزان وسعت آن در دوره مطالعه کاسته شده است.

پیش‌بینی نقشه‌های کاربری اراضی برای ۱۵ سال آینده از منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که در طی سال ۲۰۳۵ کاربری زمین‌های شور ۱۳۳۴۶/۵۵ هکتار (۶۳ درصد) خواهد بود. سایر کاربری‌ها نیز به ترتیب کاربری پوشش گیاهی با ۵۶۰۱/۷۸ هکتار(۲۶/۴ درصد) و کاربری سطوح آبی با ۲۲۶۵/۷۵ هکتار (۱۰/۶ درصد) در رده‌های بعدی قرار دارند که این نشان دهنده کاهش سطح آبی و افزایش سطح شوره‌زار نشان از وقوع خشکسالی و کاهش میزان بارش درمنطقه مورد مطالعه می‌باشد.

نتایج این معیارها برای پارامتر بارش، بالا محاسبه شد که نشان دهنده عملکرد نامناسب مدل برای شبیه‌سازی داده‌های بارش است و علت آن می‌تواند ناشی از تغییرپذیری زیاد داده‌های بارش در بعضی از ماه‌ها باشد. همچنین در ماه‌های خشکسالی (خرداد، تیر، مرداد، شهریور) در حوضه مطالعاتی بارندگی بسیار کم و در حد چند میلی‌متر بوده که می‌تواند در عملکرد مدل برای پیش‌بینی بارش خطا ایجاد کند. نتایج این تحقیق در قسمت مدل‌سازی و سناریوهای اقلیمی (Hadcm3 و سناریوهای A2، A1B1، B2 و LARS-WG) با تحقیقات آرخی و همکاران (Arekhi et al., 2024)، پناهی و همکاران (Panahi et al., 2023) و کرمی و همکاران (Karami et al., 2022) و همچنین در قسمت ارزیابی و تحلیل ریسک‌های زیست محیطی تالاب‌ها با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره با تحقیقات جعفری‌آذر و همکاران (Jafariazar et al., 2019) و جعفری‌آذر و همکاران (Jafariazar et al., 2017) مطابقت دارد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ گونه تضاد منافعی با افراد دیگری ندارند.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سپاسگزاری

نویسندگان بدین وسیله از همه کسانی که به نوعی در انجام این پژوهش یاری رسانده‌اند، قدردانی می‌نماید.

References

Aghashahi, M., Ardestani, M., & Fahmi, H. (2013). *Climate Change in Lake Urmia*. Master's thesis, University of Tehran, Faculty of Environment. [In Persian]

Alizadeh, A. (2010). *Principles of Applied Hydrology* (7th ed.). Mashhad: Astan Quds Razavi Publications. [In Persian]

Arekhi, S., Gerkaz, S., & Emadadin, S. (2024). Zoning of flood risk under the influence of climate change using the SWAT hydrological model in a GIS environment (Case study: Gharesu watershed, Golestan province). *Climate Change Research, 4*(14), 1-26. [In Persian] https://doi.org/10.30488/ccr.2023.394308.1127

Brooks, R. T. (2009). Potential impacts of global climate change on the hydrology and ecology of ephemeral freshwater systems of the forests of the northeastern United States. *Climate Change, 95*(3), 469–483. http://dx.doi.org/10.1007/s10584-008-9531-9

Bussi, G., Whitehead, P., Thomas, A., Masante, D., Jones, L., Cosby, J., … & Prosser, H. (2017). Climate and land-use change impact on faecal indicator bacteria in a temperate maritime catchment (the River Conwy, Wales). *Journal of Hydrology*, *553*, 248-261. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.011

Chen, H., Xu, C. Y., & Guo, S. (2012). Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of Hydrology*, *434*, 36-45. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.040

Golestan Province Meteorological Organization. (2019). Statistics and data from meteorological stations. [In Persian]

Gordon, C., Cooper, C., Senior, C. A., Banks, H., Gregory, J. M., Johns, T. C., ... & Wood, R. A. (2000). The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, *16*, 147-168. https://doi.org/10.1007/s003820050010

Griggs, D. J., & Noguer, M. (2002). Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Weather*, *57*(8), 267-269. https://doi.org/10.1256/004316502320517344

Hajivandpaydari, S., Yazdanpanah, H., & Andarzian, S. B. (2022). Investigation of regional effects of climate change phenomenon in the north of Khuzestan province using HadCM3 model under LARS-WG exponential comparison in the statistical period of 2030-2010 and 2050-2030. *Geography and Human Relationships*, *5*(1), 299-314. [In Persian] https://doi.org/10.22034/gahr.2022.330821.1669

Heller, N. E., & Zavaleta, E. S. (2009). Biodiversity Management in the Face of Climate Change: A Review of 22 Years of Recommendations. *Biological Conservation, 142*, 14-32. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.10.006

Jafariazar, S., Sabzghabaei, G. R., Tavakoly, M., & Dashti, S. (2019). Assessment and Management of environmental risk of Salty, Sweet and Minab Rivers International Wetlands on the basis of multi-criteria decision-making methods. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, *5*(4), 65-88. http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.5.4.65

Jafariazar, S., Sabzghabaei, G. R., Tavakoly, M., & Dashti, S. S. (2017). Assessment and Analysis of Khur-e-khuran International Wetland Environmental Risks Using Multi-Criteria Decision-Making Methods. *Irrigation Sciences and Engineering*, *40*(3), 63-75. [In Persian] https://doi.org/10.22055/jise.2017.13262

Karami, R., Rezaei, H., Salman Mahini, A., & Ghorbani, K. (2022). Climate Change Assessment in the basin of Hamoon International Wetlands Using LARS-WG6 Model. *Journal of Natural Environmental Hazards*, *11*(31), 107-122. [In Persian] https://doi.org/10.22111/jneh.2021.36069.1710

Khalyani, A. H., Gould, W. A., Harmsen, E., Terando, A., Quinones, M., & Collazo, J. A. (2016). Climate change implications for tropical islands: Interpolating and interpreting statistically downscaled GCM projections for management and planning. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *55*(2), 265-282. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0182.1

Kim, J., Choi, J., Choi, C., & Park, S. (2013). Impacts of changes in climate and land use/land cover under IPCC RCP scenarios on streamflow in the Hoeya River Basin, Korea. *Science of the Total Environment*, *452*, 181-195. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.005

Kim, K. G., Lee, H., & Lee, D. H. (2011). Wetland restoration to enhance biodiversity in urban areas: a comparative analysis. *Landscape and Ecological Engineering*, *7*, 27-32. https://doi.org/10.1007/s11355-010-0144-x

Lemly, A. D. (1997). Risk assessment as an environmental management tool: considerations for freshwater wetlands. *Environmental Management*, *21*(3), 343-358. https://doi.org/10.1007/s002679900034

Malekmohammadi, B., & Blouchi, L. R. (2014). Ecological risk assessment of wetland ecosystems using multi criteria decision making and geographic information system. *Ecological Indicators*, *41*, 133-144. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.01.038

Malekmohammadi, B., Blouchi, L. R., Ghehi, N. K., & Shakib, F. J. (2015). Investigating the Effects of Climate Change on Wetlands Using Risk Assessment and Remote Sensing (Case Study: Choghakhor Wetland, Iran). Paper presented at the US-Iran Symposium on Climate Change: Impacts and Mitigations, California.

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Paper presented at the Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (pp. 179-183).

Mehdinasab, M., & Bagherzadeh Karimi, M. (2020). Environmental Risk Assessment of Poldokhtar Wetlands Based on Model EFMEA. *Environment and Interdisciplinary Development*, *5*(69), 27-36. [In Persian] https://doi.org/10.22034/envj.2020.181306

Panahi, A. P., Janbaz Ghobadi, G., Motavalli, S., & Khaledi, S. (2024). Investigating climate change and transformation of natural components with emphasis on floods (Case study: Gorganrood watershed). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(3), 184-213. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.84657.1419

Panahi, A., Janbaz Ghobadi, G., Motavalli, S., & Khaledi, S. (2023). Measuring and predicting flood potential under climate change conditions (case study: Gorganrood watershed). *Geographical Studies of Coastal Areas Journal*, *4*(2), 45-61. [In Persian] https://doi.org/10.22124/gscaj.2023.22411.1172

Rahimi Blouchi, L., & Malekmohammadi, B. (2013). Environmental Risk Assessment of Shadegan International Wetland Based on Ecological Indicators. *Journal of Environmental Studies*, *39*(1), 101-112. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jes.2013.30394

Ramsar Convention Secretariat. (2007). *Ramsar Handbooks for the Wise Use of Wetlands*(3rd ed.). Ramsar Convention Secretariat: Gland, Switzerland. https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/references/wise-use-of-wetlands-ramsar-2007.pdf

Semenov, M. A., Brooks, R. J., Barrow, E. M., & Richardson, C. W. (1998). Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research*, *10*(2), 95-107. http://dx.doi.org/10.3354/cr010095

UNDP. (2013). National Environment Council for Sustainable Development. Sustainable Wetland Management in the Face of Climate Risks in Niger: The Case of La Mare de Tabalak, International Institute for Sustainable Development (IISD).

Ziaee, N., Ownegh, M., Asgari, H. R., Massah Bavani, A. R., Salman Mahini, A., & Hoseinalizadeh, M. (2019). Forecasting future climate variables using HadCM3 model and climate scenarios, case study: selected synoptic stations of Hableh Roud Basin. *Watershed Engineering and Management*, *11*(3), 771-783. [In Persian] https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.110512.1298

Vol.14, No.2, Summer 2025, p.122-144 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2025.88391.1492 OPEN ACCESS

Calculating the Urban Thermal Field Variance Index and Classifying Thermal Comfort Based on Land Surface Temperature (Case Study: Sari City)

Kaka Shahedi [1]*, Arman Kiani [1], Salah Mohammadi Sarvaleh [1]

[1] Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 14 June 2024

Revised: 29 December 2024

Accepted: 15 January 2025

Available Online: 16 January 2025

Keywords:

Land Surface Temperature(LST)

Urban Heat Island (UHI)

Urban Thermal Field Variance Index (UTFVI)

Thermal Comfort Zoning

Remote Sensing

ABSTRACT

Given the significance of urban heat islands, this study examines Sari City's thermal comfort classification and the Urban Thermal Field Variance Index (UTFVI). After obtaining eleven years of Landsat 8 satellite imagery, the urban area's thermal variance index was extracted based on land surface temperature (LST) and mean temperature, and thermal comfort was classified accordingly. The results showed that the lowest recorded average surface temperature in Sari City was 30.1 °C on August 8, 2013, while the highest recorded average temperature was 40.62 °C on July 12, 2018. Therefore, it can be seen that areas with residential and commercial buildings and artificial surfaces exhibit the highest temperatures. At the pixel level, the lowest Urban Thermal Field Variance Index was 0.352 on August 1, 2022, while the highest value was 0.122 on August 7, 2016. The greatest extent of thermal comfort, covering 58.49% of the area, was recorded on July 10, 2023, for the excellent, good, and normal comfort classes. The lowest comfort level, covering 50.39% of the area, was recorded on August 8, 2023. On August 8, 2013, the bad, worse, and worst thermal comfort classes covered the largest area (49.61%), while on July 10, 2023, they covered the smallest area (41.51%). Based on these results, it can be concluded that the central areas of Sari and other parts of the city with limited green cover or unplanned construction conducted without regard to urban life standards fall into the lower comfort categories.

* Corresponding author: Kaka Shahedi E-mail address: k.shahedi@sanru.ac.ir

How to cite this article: Shahedi, K., Kiani, A., & Mohammadi Sarvaleh, S. (2025). Calculating the Urban Thermal Field Variance Index and Classifying Thermal Comfort based on Land Surface Temperature (Case Study: Sari City). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 14*(2), 122-144. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.88391.1492

©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

Due to the fact that many people live in urban areas, it is critical to consider urban temperature when making decisions regarding urban management. Urban heat islands are a phenomenon caused by changes in the thermal energy balance of urban areas as a result of burning fossil fuels, high vehicle density, expanding impermeable surfaces, and a lack of proper vegetation cover. Therefore, it is essential to monitor land surface temperature (LST) and categorize it quantitatively and qualitatively using standard indices to measure thermal comfort. The Urban Thermal Field Variance Index (UTFVI), which is used to categorize LST in terms of thermal satisfaction in urban contexts, is one such criterion.

Material and Method

In this research, Landsat 8 satellite images of Sari City for 11 summer seasons (2013–2023) were downloaded from the USGS website. Then, ENVI 5.3 software was used to preprocess the images (geometric and radiometric corrections). Segment-by-segment calculations of spectral radiance, black body temperature, NDVI, and vegetation cover were carried out using the digitized data of each image and the urban area map. The land surface temperature and emissivity were estimated using the split-window approach. The Urban Thermal Field Variance Index was evaluated using ArcGIS 10.5 software, which took into account the LST of each pixel as well as the average LST of all pixels. A zoning map of this index was then created in six classes (excellent, good, normal, bad, worse, and worst) using the UTFVI.

Results and Discussion

The results showed a negative correlation between temperature and vegetation cover. The lowest recorded average surface temperature in Sari City was 30.1 °C on August 8, 2013, while the highest recorded average temperature was 40.62 °C on July 12, 2018. At the pixel scale, the lowest UTFVI was –0.352 on August 1, 2022, while the highest value was 0.122 on August 7, 2016. However, the average of this index over all years was nearly zero.

The highest level of thermal comfort, covering 58.49% of the area, was recorded on July 10, 2023, for the excellent, good, and normal classes; and the lowest level, covering 50.39% of the area, was recorded on August 8, 2023. On August 8, 2013, the bad, worse, and worst thermal comfort classes covered the largest area (49.61%), while on July 10, 2023, they covered the smallest area (41.51%).

Considering the overall upward temperature trend over the study period, it may seem paradoxical that thermal comfort zones in the normal, good, and excellent classes have expanded over the 11 years. This contradiction lies in the structure of the UTFVI equation. The average LST of the urban area and the pixel-level LST are the two key parameters in this index. Thermal comfort is classified as excellent, good, or normal when the pixel-level LST is lower than the urban average. Conversely, if pixel-level LST exceeds the urban average, thermal comfort falls into the bad, worse, or worst categories. As the difference between pixel-level and average LST increases, thermal comfort shifts from normal to worst.

Conclusion

Thermal comfort, heat islands, and variations in land surface temperature are all significant indicators for evaluating the sustainability of the urban environment. Given the general trend of rising urban temperatures and climate change, attention must be given to construction practices, land-use changes, and the development of green spaces such as parks and gardens—all of which can significantly reduce LST.

Other factors affecting temperature variation in urban areas include cloud cover, solar radiation intensity, vehicle density, refrigeration and air conditioning systems, and electric energy consumption. Addressing these elements within the context of urban management is key to achieving sustainable urban development.

Acknowledgements

This study was supported by funding from Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. We are grateful to all the scientific advisors who contributed to this research.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۱۴۴-۱۲۲

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2025.88391.1492 دسترسی آزاد

برآورد شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری و طبقه‌بندی آسایش حرارتی با استفاده از دمای سطح زمین (مطالعه موردی: شهر ساری)

کاکا شاهدی[1*]، آرمان کیانی[1]، صلاح محمدی سروآله[1]

[1] گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۶

کلمات کلیدی:

دمای سطح زمین (LST)

جزیره گرمایی شهری (UHI)

شاخص واریانس میدان حرارتی شهری (UTFVI)

زون‌بندی آسایش حرارتی

سنجش از دور

چکیده

با توجه به اهمیت جزایر حرارتی شهری، در این پژوهش شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری و طبقه‌بندی آسایش حرارتی در شهر ساری مورد مطالعه قرار گرفت. پس از اخذ تصاویر ماهواره لندست ۸ برای ۱۱ سال، شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری براساس دمای سطح زمین و میانگین دما استخراج، و آسایش حرارتی براساس آن طبقه‌بندی شد. نتایج نشان داد میانگین دمای سطح زمین شهر ساری، در تاریخ ۱۷ مرداد ۱۳۹۲ دارای کمترین میزان یعنی ۳۰/۱ درجه سلسیوس و بیشترین میانگین دما در ۲۱ تیر ۱۳۹۷ به میزان ۴۰/۶۲ درجه سلسیوس می‌باشد. بنابراین می‌توان دریافت که، مناطق دارای ساختمان‌های مسکونی و تجاری و پوشش‌های مصنوعی بیشترین دما را دارا می‌باشند. کمترین میزان شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری در سطح پیکسل در ۱۰ مرداد ماه ۱۴۰۱ برابر با ۰/۳۵۲- و بیشترین مقدار آن در ۱۷ مرداد ۱۳۹۵ به مقدار ۰/۱۲۲ محاسبه شد. طبقه عالی، خوب و نرمال آسایش حرارتی در ۱۹ تیر ۱۴۰۲ دارای بیشترین پهنه به میزان ۵۸/۴۹ درصد مساحت و کمترین میزان آن در ۱۷ مرداد ۱۳۹۲ یعنی ۵۰/۳۹ درصد مساحت را دارا می‌باشد. طبقه بد، بدتر و بدترین آسایش حرارتی در ۱۷ مرداد ۱۳۹۲ دارای بیشترین پهنه به میزان ۴۹/۶۱ درصد مساحت و کمترین میزان آن در ۱۹ تیر ۱۴۰۲ به میزان ۴۱/۵۱ درصد را شامل می‌شود. براساس این نتایج می‌توان دریافت که، مناطق مرکزی شهر ساری و دیگر مناطقی از شهر که پوشش سبز کمتری دارند یا در آن‌ها ساخت و سازهای غیراصولی بدون توجه به الگوهای زیست شهری انجام گرفته در طبقه پایینی از آسایش قرار می گیرند.

* نویسنده مسئول: دکتر کاکا شاهدی

E-mail: k.shahedi@sanru.ac.ir

مقدمه

در طول سه دهه آینده، پیش‌بینی می‌شود که مناطق شهری، بیش از ۷۰ درصد جمعیت جهان را در خود جای دهند (Al Rakib et al., 2021). تغییرات اقلیمی در شهرها براساس دو عامل متمایز به وجود می‌آید: عامل اول در مقیاس کل کره زمین و عامل دیگری در مقیاس شهری و منطقه‌ای می‌باشد (Walsh et al., 2014). جایگزینی مواد و مصالح ساختمانی مانند بتن و آسفالت در توسعه شهری به جای درختان و دیگر پوشش طبیعی، میزان جذب و ذخیره انرژی حرارتی را در شهرها نسبت به مناطق روستایی افزایش می‌دهد (Pouramin, Khatami & Shamsodini, 2020) بنابراین محدوده‌های شهری دارای بیلان انرژی و آبی متفاوتی در قیاس با نواحی غیر شهری هستند (Esmaeeli, 2022). برای داشتن شهری با توانایی زیست پذیری بالا باید مسائلی مانند عوامل اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی را در نظر گرفت. در میان این عوامل، بعد محیط زیستی مهم‌تر از سایر عوامل است (Aghdar, Shayesteh, Mohammadyari & Rangzan, 2020). از آنجایی که فضای سبز و دمای سطح زمین[1] از پارامترهای محیط زیست شهری محسوب می‌شوند (Esmaeeli, 2022)، مطالعات تغییرات زمانی پوشش گیاهی و درجه حرارت در مناطق شهری به عنوان شاخص نشان دهنده شرایط زیست محیطی حاکم بر آن از اهمیت خاصی برخوردار است (Aghdar et al., 2020). تغییرات زیاد کاربری و پوشش اراضی سبب ایجاد جزایر حرارتی در شهرها گشته است (Mansourmoghaddam et al., 2023). جزایرحرارتی شهری در یک محدوده شهری با دمای بالاتر از مناطق اطراف آن شناخته می‌شود (Jumari et al., 2023). عوامل مهمی مانند رطوبت نسبی مورد نیاز برای تبخیر و تعرق، تغییرات در شار تابشی، جریان‌های نزدیک به سطح زمین و انتشار گرمای انسان ساز نیز در تشکیل و تشدید جزیره حرارتی شهری مؤثر می‌باشند (Khosravi, Heidari, Tavakoli & Zamani, 2017). از سوی دیگر شهر به دلیل وجود ذرات معلق، کمتر از نواحی روستایی آفتاب دریافت می‌کند و با این حال گرم‌تر از نواحی روستایی مجاور است. زیرا محیط شهر، هم به علت تولید حرارت بیشتر ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی و هم به علت وجود سطوح نفوذ ناپذیر و ساختمان‌های بلند به عنوان جمع کننده حرارت عمل کرده و جزیره حرارت شهری بر روی شهر تشکیل می‌شود (Niliyeh Brojeni & Ahmadi Nadoushan, 2019). برآورد دمای سطح زمین یکی از موضوعات مهم مطالعات محیطی و فعالیت های مدیریت شهری محسوب می‌شود (Sobrino, Jimenez & Paolinib, 2004). روش‌های سنتی برآورد دمای سطح مثل ایستگاه‌های هواشناسی و دیگر دیده‌بانی‌های بخش‌های خصوصی و عمومی برای همه انواع شرایط زمینی امکان ناپذیر و زمان‌بر هستند (Niliyeh Brojeni & Ahmadi Nadoushan, 2019). لذا علم سنجش از دور یکی از بهترین ابزار برای مشخص نمودن این پدیده و برطرف نمودن مشکلات ناشی از روش اندازه‌گیری زمینی می‌باشد (Khedmatzadeh, Mousavi, Mohamadi Torkamani & Mohammadi, 2021). امروزه سنجش از دور ماهواره‌ای می‌تواند امکان بررسی دمای سطح زمین را فراهم آورد و به درک جریان‌های انرژی در منطقه‌های شهری کمک کند (Niliyeh Brojeni & Ahmadi Nadoushan, 2019). الگوریتم‌های بسیاری به وسیله محققان برای محاسبه دمای سطح زمین مانند پنجره مجزا، ثابت پلانک، زاویه دوتایی و غیره ارائه شده‌اند، که کارشناسان و برنامه‌ریزان را تا حد زیادی در مدیریت و زیست شهری کمک می‌کند. دمای سطح زمین، لازم است توصیفی کمی و کیفی از پایداری دمای محیط نسبت به دمای سطح زمین و جزایر حرارتی را ارائه دهد (Tomlinson, Chapman, Thornes & Baker, 2011). این مهم با استفاده از شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری[2] انجام می‌پذیرد، در واقع این شاخص پهنه‌های آسایش حرارتی را براساس رضایت از دما در مناطق شهری مورد بررسی و طبقه‌بندی قرار می‌دهد (Wang, Zhang, Tsou & Li, 2017).

برآورد دمای سطح زمین در محدوده‌های شهری با استفاده از تصاویر لندست ۷ و ۸ توسط نرم افزارهای کاربردی ENVI و Arc GIS در مناطق مختلفی از شهرهای جهان توسط محققان گوناگونی مورد بررسی قرار گرفته است، به طوریکه، اکثر این مطالعات تغییرات دمای سطحی در مناطق شهری را با شاخص پوشش گیاهی و کاربری اراضی مرتبط می‌دانند، که بیان کننده یک رابطه

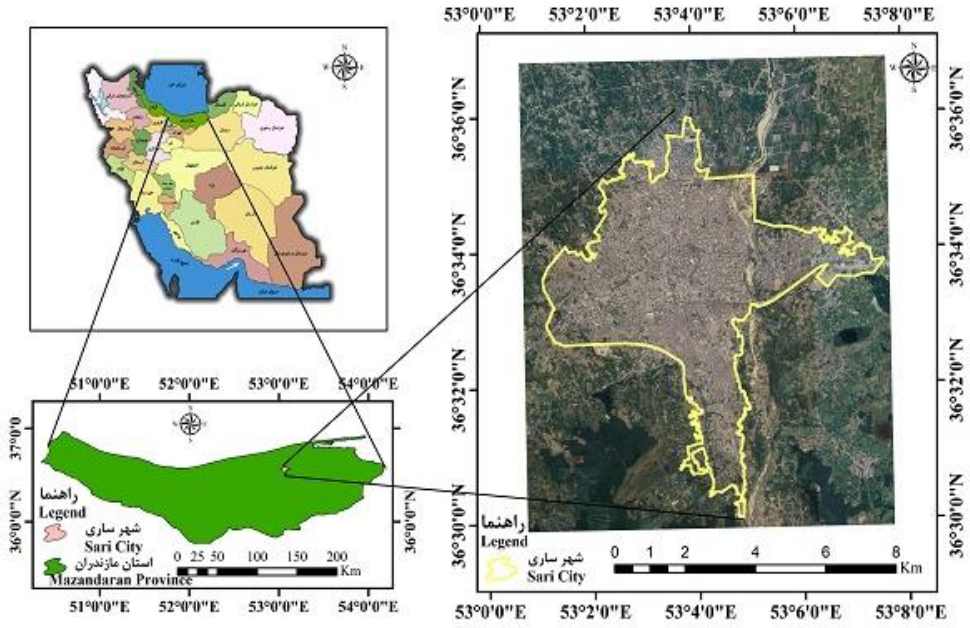
1- Land Surface Temperature (LST)
2- Urban Thermal Field Variance Index (UTFVI)

معکوس، بین دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی است. لذا افزایش توده گیاهی را عامل کاهش دمای سطح زمین در مناطق شهری بیان می‌کنند و همچنین توسعه مناطق شهری را عامل بالا رفتن دما در این مناطق می‌دانند (Khedmatzadeh et al., 2021; Asghari Sarasekanrood & Asadi, 2021; Marcel & Villot, 2021; Esmaeeli, 2022; Moazzam, Doh & Lee, 2022; Azimi, Akbari & Armin, 2023; Jumari et al., 2023). در شماری از این مطالعات علاوه بر موثر دانستن عامل شاخص پوشش گیاهی و کاربری اراضی، عوامل دیگر و متنوعی چون عوامل ژئومورفولوژیکی (ارتفاع، شیب و غیره) و اقلیمی (باد، تبادلات جوی) را مؤثر بر تغییرات دمای سطح زمین می‌دانند (Khedmatzadeh et al, 2021; Asghari Sarasekanrood & Asadi, 2021; Esmaeeli, 2022; Jumari et al, 2023). همچنین در بعضی از پژوهش‌ها بیان شد که دمای سطح زمین در چندین روز از سال به تنهایی نمی‌تواند نگرش کلی و منطقی برای مدیران و برنامه‌ریزان فراهم کند (Marcel & Villot, 2021; Moazzam et al., 2022; Azimi et al., 2023). بعضی از پژوهشگران در تحقیقات خود نیز با استفاده از دمای سطح زمین اقدام به برآورد شاخص واریانس حرارتی محدوده‌های شهری کرده و ترسیم پهنه آسایش حرارتی در ۶ طبقه عالی، خوب، نرمال، بد، بدتر و بدترین انجام دادند. آن‌ها دریافتند این طبقه‌بندی کیفی به سبب راحتی در ارائه نتایج و تفسیر و تحلیل تا حد زیادی می‌تواند برای مدیران قابل درک و متقاعد کننده‌تر باشد (Ahmed, 2018; Kafy et al., 2021; Sejati, Buchori & Rudiarto, 2022; Kikon, Kumar & Ahmed, 2023; Jumari et al., 2023).

بنابراین در این پژوهش، یکی از مباحث زیست شهری یعنی جزایر حرارتی و آسایش حرارتی با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ در شهر ساری، برای یک دوره زمانی ۱۱ ساله در فصل تابستان مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شهر ساری یکی از شهرهای ایران است که رشد و توسعه سریع و شتاب زده آن طی دهه‌های اخیر به علت رشد جمعیت، مهاجرت سریع، سیاست‌های زمین شهری (Nikpour & Yarahmadi, 2023) تغییر سبک زندگی و افزایش رفاه عمومی داشته است، از سوی دیگر نتایج مطالعات متعدد بیانگر تغییر متوسط دما در محیط شهری می‌باشد (Kikon et al., 2023).

منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش شهر ساری در استان مازندران به وسعت ۳۵۱۴ هکتار که در موقعیت جغرافیایی ″۰۹ ′۰۱ °۵۳ تا ″۳۶ ′۰۷ °۵۳ طول شرقی و ″۰۲ ′۳۰ °۳۶ تا ″۵۷ ′۳۵ °۳۶ عرض شمالی قرار دارد، به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید (شکل ۱). میانگین بارش سالانه ساری برابر ۷۸۹ میلی‌متر (Shahinejad & Dehghani, 2016)، میانگین دمای هوا ۱۷/۲درجه سلسیوس و ارتفاع متوسط از سطح دریا برابر ۳۲ متر می‌باشد (Kamyabi & Abdi, 2016). این شهر در تمامی دوره‌های سرشماری پر جمعیت‌ترین شهر استان مازندران بوده است. در سال ۱۳۳۵ این شهر ۲۶۲۷۸ نفر جمعیت داشته که این رقم در سال ۱۳۹۵ به ۳۲۵۷۸۷ نفر رسیده است (Nikpour & Yarahmadi, 2023).



شکل ۱- موقعیت شهر ساری در ایران و استان مازندران

Fig.1. Location of Sari city in Iran and Mazandaran province

مواد و روش‌ها

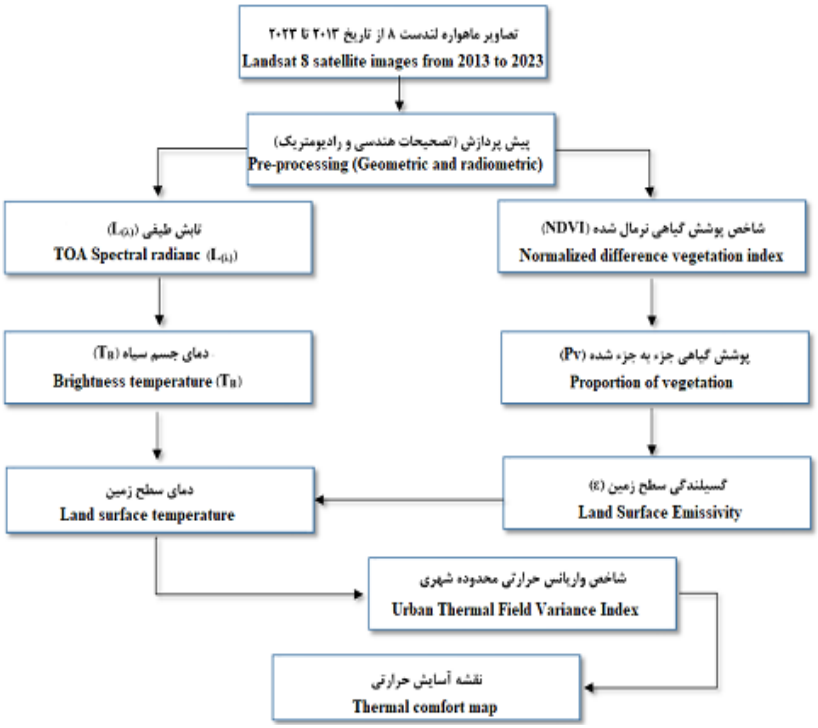
در این پژوهش، ابتدا تصاویر ماهواره لندست ۸ برای ۱۱ سال بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ در فصل تابستان از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا[1] اخذ گردید (جدول۱). سپس با استفاده از نرم افزار ENVI 5.3 با استفاده از ۱۵ نقطه زمینی هندسه تصاویر برای اعمال تصحیحات هندسی مورد ارزیابی قرار گرفت با توجه به آنکه خطای آن مقادیر تقریبا ناچیزی می‌باشد، لذا از آن چشم پوشی گردید. تصحیح اتمسفری فلش در راستای تصحیحات رادیومتریک انجام پذیرفت. براساس مقادیر رقومی هر تصویر پارامترهایی چون تابش طیفی، دمای جسم سیاه، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده و پوشش گیاهی جزء به جزء شده در محدوده شهری برش داده شده برآورد می‌گردد. بعد از آن گسیل‌مندی سطح زمین و دمای سطح زمین نیز براساس الگوریتم تابع پلانک در باند ۱۰ ماهواره لندست ۸ محاسبه خواهد شد. با استفاده از دمای سطح زمین مربوط به هر پیکسل و میانگین دمای سطح زمین کل پیکسل‌ها با استفاده از نرم افزار Arc GIS 10.5 شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری به صورت کمی برآورد شده و با استفاده از جدول طبقه‌بندی مربوطه آن نقشه پهنه کیفی این شاخص در ۶ طبقه ترسیم می‌شود (شکل۲).

1- http://earthexplorer.usgs.gov

جدول ۱- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای اخذ شده برای شهر ساری

Table 1- Specifications of satellite images obtained for the Sari city

شماره Number	تاریخ Calendar	ردیف Row	گذر Path	خطا هندسی Geometric error
1	17 مرداد 1392(August 8, 2013)	35	163	0.02
2	10 مرداد 1393(August 2, 2014)	34	164	0.02
3	14 مرداد 1394(August 5, 2015)	34	164	0.05
4	17 مرداد 1395(August 7, 2016)	34	164	0.02
5	19 مرداد 1396(August 10, 2017)	35	164	0.01
6	21 تیر 1397(July 12, 2018)	34	164	0.04
7	9 مرداد 1398(July 31, 2019)	35	164	0.05
8	21 مرداد 1399(August 11, 2020)	35	163	0.02
9	14 مرداد 1400(August 5, 2021)	34	164	0.03
10	10 مرداد 1401(August 1, 2022)	35	163	0.03
11	19 تیر 1402(July 10, 2023)	34	164	0.03



شکل ۲- مراحل محاسبه دمای سطح زمین و شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری برای آسایش حرارتی

Fig.2. Steps to calculate land surface temperature and urban area thermal variance index for thermal comfort

تبدیل عدد رقومی[1] به تابش طیفی

برای استخراج دمای سطوح در ماهواره لندست ۸ اولین اقدام تبدیل عدد رقومی به تابش طیفی است. این الگوریتم ارزش رقومی تصویر خام را به تابش طیفی تبدیل می‌کند، که براساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Jumari et al., 2023):

$$L_{(\lambda)} = M_L \times Q_{cal} + A_{(L)} \quad (۱)$$

$L_{(\lambda)}$ رادیانس طیفی لایه بالای اتمسفر یا باندها ($Wm^{-2}\ sr^{-1}\mu m^{-1}$)، $M_{(L)}$ عامل مقیاس‌سازی ضربی باند، $A_{(L)}$ عامل مقیاس سازی جمعی باند و $Q_{(cal)}$ ارزش رقومی باند می‌باشد. مقادیر $M_{(L)}$ و $A_{(L)}$ از فایل مرجع تصویر استخراج می‌گردند.

تبدیل رادیانس طیفی به دمای جسم سیاه

داده‌های باند حرارتی با استفاده از رابطه پلانک، از تابش طیفی به دمای جسم سیاه (BT) که در آن توان تشعشعی یک (حداکثر توان تشعشعی) فرض می شود، تبدیل می شود (Hashemi, Alavipanah & Dinarvandi, 2013). سپس دمای موثر در ماهواره به صورت رابطه (۲) برآورد می‌گردد (Avdan & Jovanovska, 2016):

$$BT = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} - 273.15 \quad (۲)$$

که BT دمای مؤثر ماهواره بر حسب کلوین، K_1 ثابت کالیبراسیون اول معادله یعنی ۷۷۴/۸۹ بر حسب ($Wm^{-2}\ sr^{-1}\mu m^{-1}$)، K_2 ثابت کالیبراسیون دوم معادل یعنی ۱۳۲۱/۰۸ بر حسب ($Wm^{-2}\ sr^{-1}\mu m^{-1}$)، $L_{(\lambda)}$ رادیانس پیکسل مورد نظر بر حسب ($Wm^{-2}\ sr^{-1}\mu m^{-}$[1]) می‌باشد.

شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده[2] و پوشش گیاهی جزء به جزء شده(P_V)

پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده، برای بررسی تراکم و میزان پوشش گیاهی از طریق نسبت‌گیری باندی بین باند مادون قرمز نزدیک و باند قرمز براساس رابطه (۳) انجام می‌پذیرد. مقادیر این شاخص بین اعداد ۱- تا ۱+ متغیر می‌باشد، که مقادیر عددی بالا نشان دهنده وجود پوشش گیاهی سالم و انبوه و مقادیر عددی کوچک و منفی نشان دهنده پوشش گیاهی تنک، فقیر یا بدون پوشش گیاهی می‌باشد.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (۳)$$

حال با استفاده از پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده، پوشش گیاهی جزء به جزء منطقه که نشان دهنده نسبتی از مناطق دارای پوشش گیاهی است برآورد می‌گردد (Mahmoudzadeh, Naghdbishi & Momeni, 2018) پوشش گیاهی سبز جزء به جزء شده با استفاده از رابطه (۴) برآورد می‌گردد (Jumari et al., 2023):

$$P_V = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}\right)^2 \quad (۴)$$

1- Digital Number (DN)

2 - Normalized difference vegetation index (NDVI)

گسیل‌مندی سطح زمین

نسبت بین گسیلش از یک شیء یا عارضه به گسیلش از جسمی سیاه در دمای ثابت را گسیل مندی می‌گویند. گسیلندگی سطح زمین معیاری از ویژگی‌های ذاتی سطح خاک و توانایی آن برای تبدیل انرژی حرارتی یا گرمایی به انرژی تشعشعی است (Azimi et al., 2023). یکی از روش‌های مؤثر برای تخمین گسیل مندی سطح زمین، مدل ترکیبی درصد پوشش زمین است، با این فرض که خاک لخت و پوشش گیاهی مقدار گسیلمندی مشخصی دارند (Shakiba, Firoozabadi, Ashourloo & Namdari, 2009) گسیلندگی سطح زمین (ε) با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon = mP_v + n \quad (۵)$$

در رابطه بالا P_V پوشش گیاهی جزء به جزء است که در رابطه (۴) برآورد شده و مقدار m و n به وسیله روابط (۶) و (۷) تعیین می‌شوند:

$$m = \varepsilon_v - \varepsilon_s - (1-\varepsilon_s)F\varepsilon_v \quad (۶)$$

$$n = \varepsilon_S + (1-\varepsilon_S)F\varepsilon_v \quad (۷)$$

در روابط بالا ε_v گسیل‌مندی پوشش گیاهی به طور معمول برابر ۰/۹۹ و ε_s گسیل‌مندی خاک براساس کتابخانه طیفی ماهواره استر برابر۰/۹۷ می‌باشد (Sobrino et al., 2004)، F ضریب شکل می‌باشد (Sobrino, Caselles & Becker, 1990) که عمدتاً مقدار ثابت آن ۰/۵۵ می‌باشد.

محاسبه دمای سطح زمین

دمای سطح زمین به صورت رابطه (۸) برآورد می‌گردد (Jumari et al., 2023):

$$LST = \frac{BT}{\left\{1 + \left[\left(\frac{\lambda BT}{\rho}\right) ln\varepsilon\right]\right\}} - 273.15 \quad (۸)$$

در رابطه بالا LST دما بر حسب درجه سلسیوس، λ طول موج رادیانس بر حسب متر و ρ ضریب ثابت می‌باشد که از رابطه $\rho=hck^{-}$ [1] به دست می آید که h ثابت پلانک یعنی مقدار $۶/۶۲۶\times۱۰^{-۳۴}$ ژول ثانیه، c سرعت نور برابر $۲/۹۹۸\times۱۰^{۴}$ متر بر ثانیه و k ثابت استفان- بولتزمن $۱/۳۸\times۱۰^{-۲۳}$ ژول بر کلوین می باشد.

شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری

شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری یک معیار کمی است که وجود آسایش حرارتی در محیط را برای تعیین وضعیت محیط و شرایط سلامت شهری ارزیابی می‌کند. این شاخص بازگو کننده محدوده‌ای است که افراد در محیط اطراف خود احساس راحتی بیشتری می‌کنند. همچنین به مسئولان شهری این امکان را می‌دهد که خطرات ناشی از گسترش جزایر حرارتی شهری را شناخته و راهکارهایی برای کاهش دمای مناطق شهری پیشنهاد نمایند (Kafy et al., 2021). رابطه (۹) به عنوان پایه و اساس محاسبه شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری عمل می‌کند (Jumari et al., 2023) و براساس دمای سطح زمین برآورد می‌گردد (Kikon et al., 2023):

$$UTFVI = \frac{LST - LST_{mean}}{LST_{mean}} \quad (۹)$$

که طبقه‌بندی آن به صورت بیان آسایش حرارتی در شش طبقه مجزا با هدف آشکارسازی سطوح کیفی و ارائه الگوهای شرایط محیطی در محدوده شهرها بیان می‌شود (جدول ۲) (Guha, Govil, Dey & Gill, 2018).

جدول ۲- طبقه بندی آسایش حرارتی بر مبنای شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری (Guha et al, 2018)

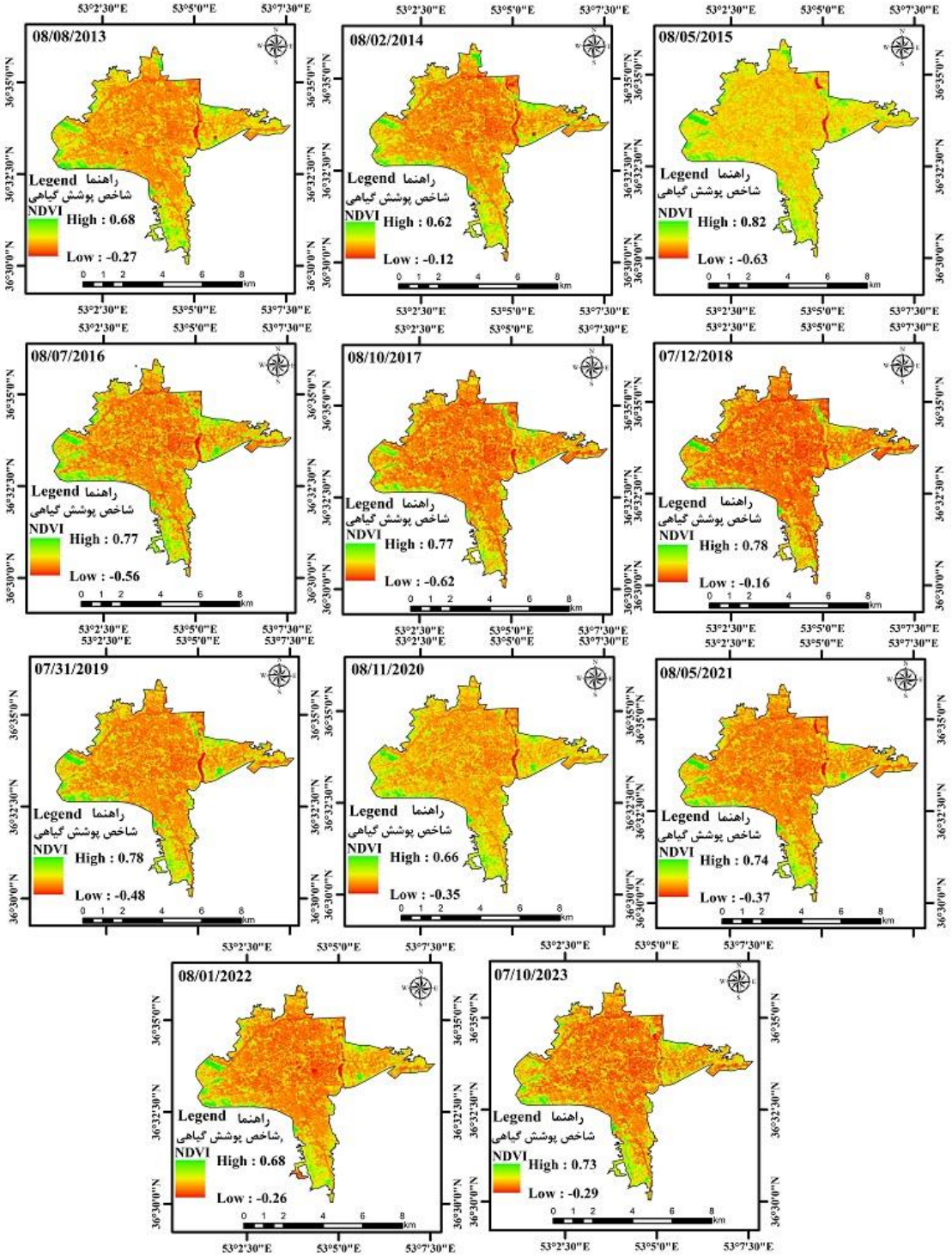
Table 2-Thermal comfort classification based on the urban thermal field variance index

شماره Number	شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری Urban thermal field variance index	طبقه آسایش حرارتی Thermal comfort classification
1	< 0.0	عالی (Very good)
2	0.000 – 0.005	خوب (Good)
3	0.005 – 0.010	نرمال (Normal)
4	0.010 – 0.015	بد (Bad)
5	0.015 – 0.020	بدتر (Worse)
6	> 0.020	بدترین (Worst)

نتایج و بحث

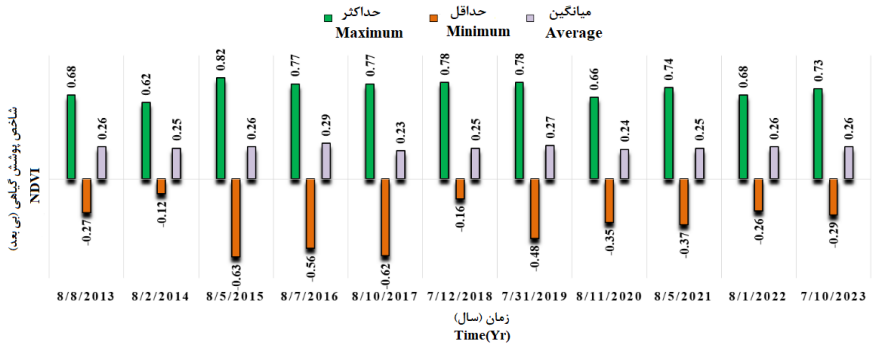
شاخص پوشش گیاهی استخراج شده

با استفاده از تصاویر ماهواره لندست مربوط به سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ و نسبت‌گیری باندی بین باند مادون قرمز نزدیک و قرمز، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) محاسبه شد (شکل ۳). حداقل، میانگین و حداکثر مقادیر عددی شاخص پوشش آن در تاریخ‌های مورد نظر نیز استخراج شد (شکل ۴). از آنجایی که شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی نماینگر شدت تراکم پوشش گیاهی است، نتایج نشان داد برای تمامی تصاویر در ۱۱ سال آماری مقادیر منفی و پایین NDVI در سطح گستره‌ای از محدوده شهری مشهود است، که این مقادیر منفی و پایین NDVI به علت وجود ساختمان‌های مسکونی و تجاری یا سطوح صاف و صیقلی مانند آسفالت یا ایزوگام و فاقد پوشش گیاهی می‌باشد. بیان مقادیر در سطح پیکسل از آن جهت دارای اهمیت است که در تصاویر ماهواره لندست ۸ مساحت هر پیکسل برابر ۹۰۰ متر مربع می‌باشد، که این گستره از مساحت در مطالعات شهری تقریبا مقدار بالایی بوده و همچنین قرارگیری کاربری‌های مصنوعی فاقد پوشش گیاهی در مجاورت بوستان‌ها، اراضی کشاورزی و پارک‌ها می‌تواند پیکسل‌ها با مقادیر متنوع با اختلاف زیاد در همسایگی همدیگر را نشان دهد. کمترین میزان شاخص NDVI در مجموع بازه زمانی ۱۱ ساله در سطح پیکسل در محدوده شهر ساری به مقدار ۰/۶۳- در تاریخ ۱۹ مرداد ماه ۱۳۹۴ و بیشترین میزان شاخص NDVI در سطح پیکسل برابر با ۰/۸۲ نیز در تاریخ ۱۹ مرداد ماه ۱۳۹۴ محاسبه شد. همچنین میانگین شاخص NDVI در کل محدوده شهر ساری، دارای کمترین میانگین NDVI به میزان ۰/۲۳ در تاریخ ۱۹ مرداد ماه ۱۳۹۶ و دارای بیشترین میانگین NDVI به میزان ۰/۲۹ در تاریخ ۱۷ مرداد ماه ۱۳۹۵ می‌باشد. میانگین شاخص پوشش گیاهی NDVI در طول سال‌های آماری تقریبا اعداد نزدیک به همدیگر را نشان می‌دهد و اختلاف قابل توجهی در آن دیده نمی‌شود که نشان‌دهنده تغییر کاربری شدید در محدوده شهر ساری باشد، ولی به صورت محدود تغییر کاربری در قسمت شرقی و قسمت شمالی شهر دیده می شود که ناشی از ساخت و سازها و گسترش مناطق تجاری و بازرگانی است. تغییرات جزئی میانگین شاخص NDVI را می‌توان به دلیل تغییر در میزان و زمان بارش‌های بهاره یا رگبارهای تابستانه، آبیاری پارک‌ها، بوستان‌ها یا مزارع داخل محدوده شهری دانست که بسته به میزان آب در دسترس و یا مقادیر پایین شاخص پوشش گیاهی در منطقه‌های شهری بطور کلی منجربه افزایش مقادیر دما در مناطق شهری می‌شود.



شکل ۳- شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) در محدوده ساری (۲۰۱۳-۲۰۲۳)

Fig.3. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in Sari city (2013-2023)

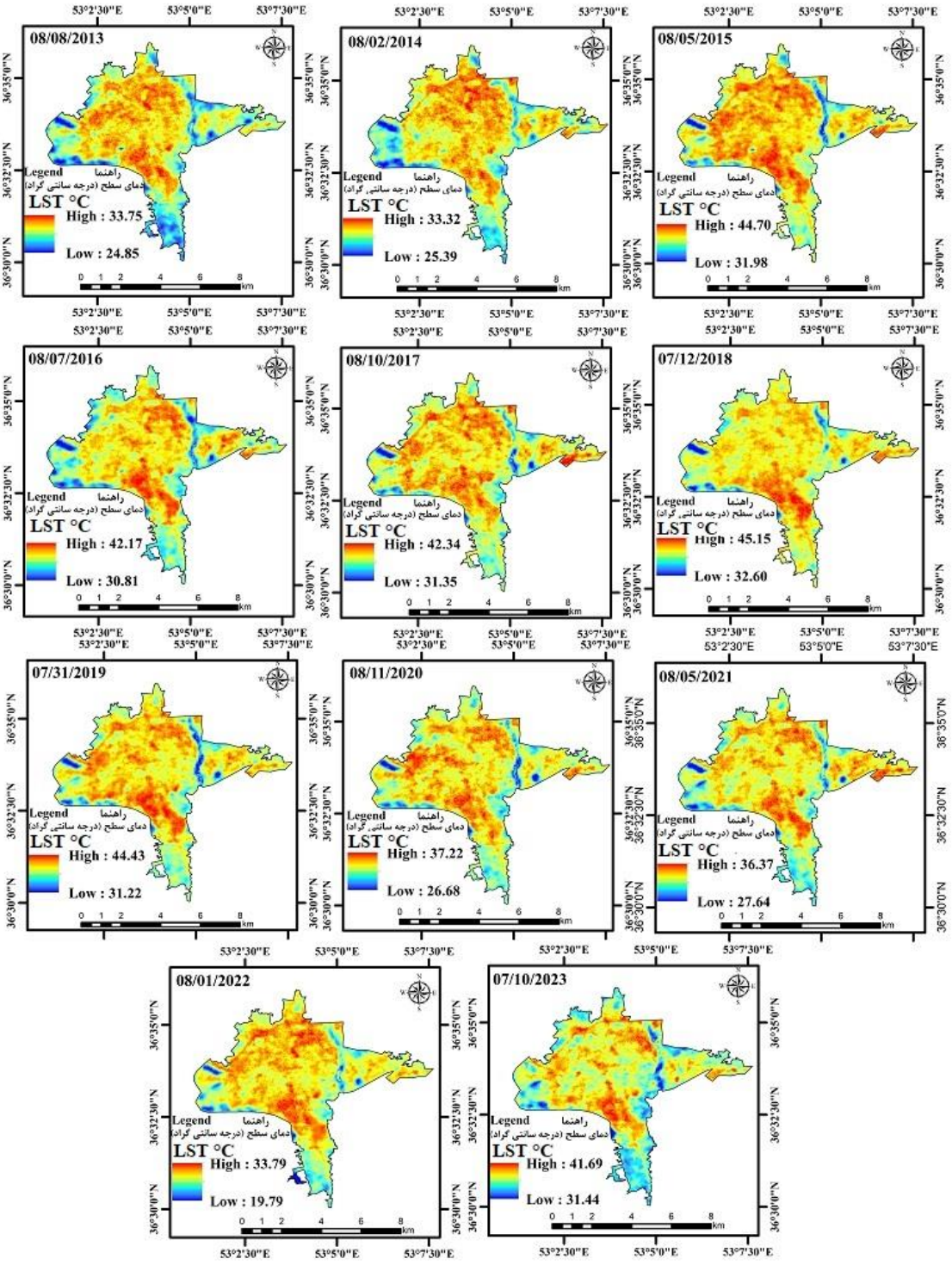


شکل ۴- نمودار حداقل، حداکثر و میانگین شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (۲۰۱۳-۲۰۲۳)

Fig.4. Graph of minimum, maximum and average of Normalized Difference Vegetation Index

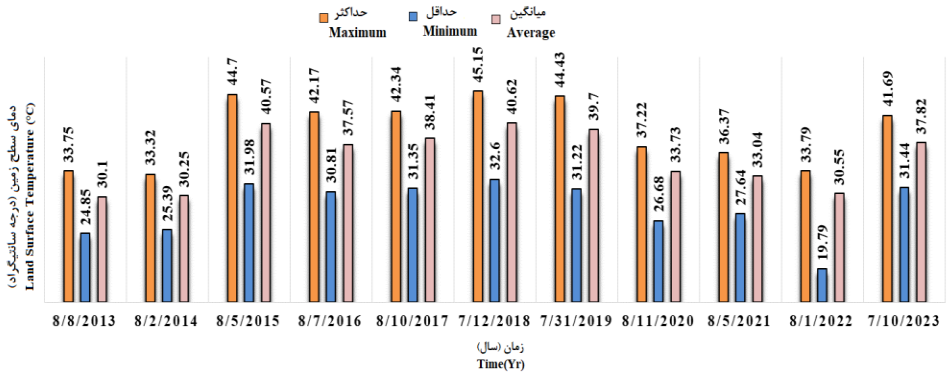
دمای محاسبه شده سطح زمین

بعد از محاسبه پوشش گیاهی جزء به جزء شده از طریق شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده و گسیلمندی سطح زمین، دمای سطح زمین برآورد گردید (شکل۵). همچنین تغییرات حداقل، حداکثر و میانگین دما مقادیر آن برای سال‌های ترسیم شد (شکل۶). کمترین دمای برآورده شده در بازه زمانی ۱۱ ساله در محدوده شهر ساری در سطح پیکسل در تاریخ ۱۰ مرداد ماه ۱۴۰۱ برابر با ۱۹/۷۹ و بیشترین دمای برآورد شده در تاریخ ۲۱ تیرماه ۱۳۹۷ به مقدار ۴۵/۱۵ درجه سلسیوس محاسبه شد. همچنین میانگین دمای سطح زمین در کل محدوده شهر ساری، در تاریخ ۱۷ مرداد ۱۳۹۲ دارای کمترین میانگین به میزان ۳۰/۱ و بیشترین میانگین دما به میزان ۴۰/۶۲ درجه سلسیوس در تاریخ۲۱ تیر ۱۳۹۷ می‌باشد. تغییرات کلی میانگین دمای سطح زمین در طول دوره آماری به صورتی است که در سال‌های ابتدایی مطالعه یعنی سال ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ میانگین حدود ۳۰/۱ درجه سلسیوس وجود دارد. این درحالی است که میانگین دمای سطح زمین بین سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۸ مقدار ۳۹/۳۷ درجه سلسیوس می‌باشد. از سال ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۱ نیز میانگین دمای سطح زمین به مقدار ۳۲/۴۴ تنزل پیدا می‌کند. این عدد در سال ۱۴۰۲ به عدد ۳۷/۸۲ درجه سلسیوس می‌رسد. تغییرات این اعداد در چهار بازه زمانی نشان می‌دهد که از ابتدا تا انتهای دوره آماری میانگین دمای سطح زمین اگر چه تغییرات افزایشی و کاهشی از خود نشان داده، ولی می توان دریافت که دمای سطح زمین در محدوه شهری، در حالت کلی افزایشی بوده است. بیشترین مقادیر دمای‌های محاسبه شده سطح زمین در تمام دوره آماری، مناطقی چون میدان ساعت، راهبندان، کوی کارگران، کمربندی شهر ساری در حوالی پایانه دولت و تقاطع خیابان معلم، خیابان ملا مجدالدین تا میدان شهدا، منطقه بین خیابان امیر مازندرانی تا خیابان جمهوری و خیابان مدنی می‌باشد، که علت آن را می‌توان وجود مراکز مسکونی، تجاری، خیابان‌ها، افزایش تراکم جمعیت، وجود وسایل نقلیه موتوری، استفاده از وسایل سرمایشی و همچنین کمبود پوشش گیاهی و فضای سبز مانند بوستان‌ها و به طور کلی سطوح نفوذناپذیر در نظر گرفت. بعضی نقاط شهر ساری مانند میدان خزر تا خیابان بهار و به سمت خیابان معلم در کمربندی ساری، منطقه محصور بین خیابان سی متری، وصال شیرازی و بلوار شهید سلیمانی، منطقه بین خیابان معلم و خیابان رسالت و همچنین مناطق حاشیه محدوده شهری چون ششصد دستگاه، پارک بانوان ساری، کمربندی شمالی، میدان مالیات و حوالی آن یعنی بزرگراه ساحلی و کمربندی جنوبی و قسمت عمده جنوب شهر ساری، شهرک شهرداری، خیابان‌های اطراف پارک ملل دارای دمای پایین می‌باشند که دلیل آن را می‌توان نزدیکی به پارک‌ها و بوستان‌ها، اراضی کشاورزی یا برخی مناطق سایه گیر و ساختمان‌های مرتفع که در معابر با عرض کم توجیه نمود. به طور کلی می توان دریافت که نوسانات دمایی که در شهر ساری وجود دارد در واقع از میزان توزیع توده گیاهی تبعیت می نماید. کاهش پوشش گیاهی در نتیجه تغییر کاربری به تنهایی باعث افزایش دما نمی‌شود، بلکه با افزایش مصرف انرژی در کاربری مسکونی و تجاری جدید ساخته شده، افزایش جمعیت ساکن شهری و همچنین افزایش آلودگی و ماندگاری و تولید دی اکسید کربن باعث بالا رفتن دما در این مناطق می‌شود.



شکل ۵- دمای سطح زمین در شهر ساری (۲۰۱۳-۲۰۲۳)

Fig.5. Land surface temperature with in the Sari city (2013-2023)



شکل ۶- نمودار حداقل، حداکثر و میانگین دمای سطح زمین شهر ساری (۲۰۱۳-۲۰۲۳)

Fig.6. Graph of minimum, maximum and average land surface temperature in the Sari city (2013-2023)

همبستگی پوشش گیاهی و دمای سطح زمین

همبستگی بین شاخص NDVI و دمای سطح زمین برای تمام ۱۱ سال مقادیر منفی را از خود نشان می دهد (جدول۳). مقدار منفی همبستگی در واقع نشان می‌دهد که دو متغیر روابط معکوسی را با همدیگر دارند، به طوری که اگر یک متغیر مقدار افزایشی را نشان دهد، متغیر دیگر مقدار کاهشی از خود بروز می‌دهد. از آنجایی که روابط همبستگی منفی بین تراکم و توده گیاهی و دمای شهر ساری وجود دارد، بنابراین می‌توان دریافت که بین دو عامل رابطه معکوس برقرار می‌باشد، و افزایش پوشش گیاهی موجب کاهش دما می‌شود. علاوه بر پوشش گیاهی عوامل دیگری چون تغییر شدت تابش خورشیدی، تغییرات اقلیمی، میزان فعالیت وسایل نقلیه، استفاده از وسایل سرمایشی و همچنین رطوبت به علت نزدیکی به دریا و غیره همگی بر میزان دمای هوا و به تبعیت از آن بر دمای سطح زمین اثر گذار بوده و می‌توانند مقادیر دمای سطح زمین را تغییر دهند.

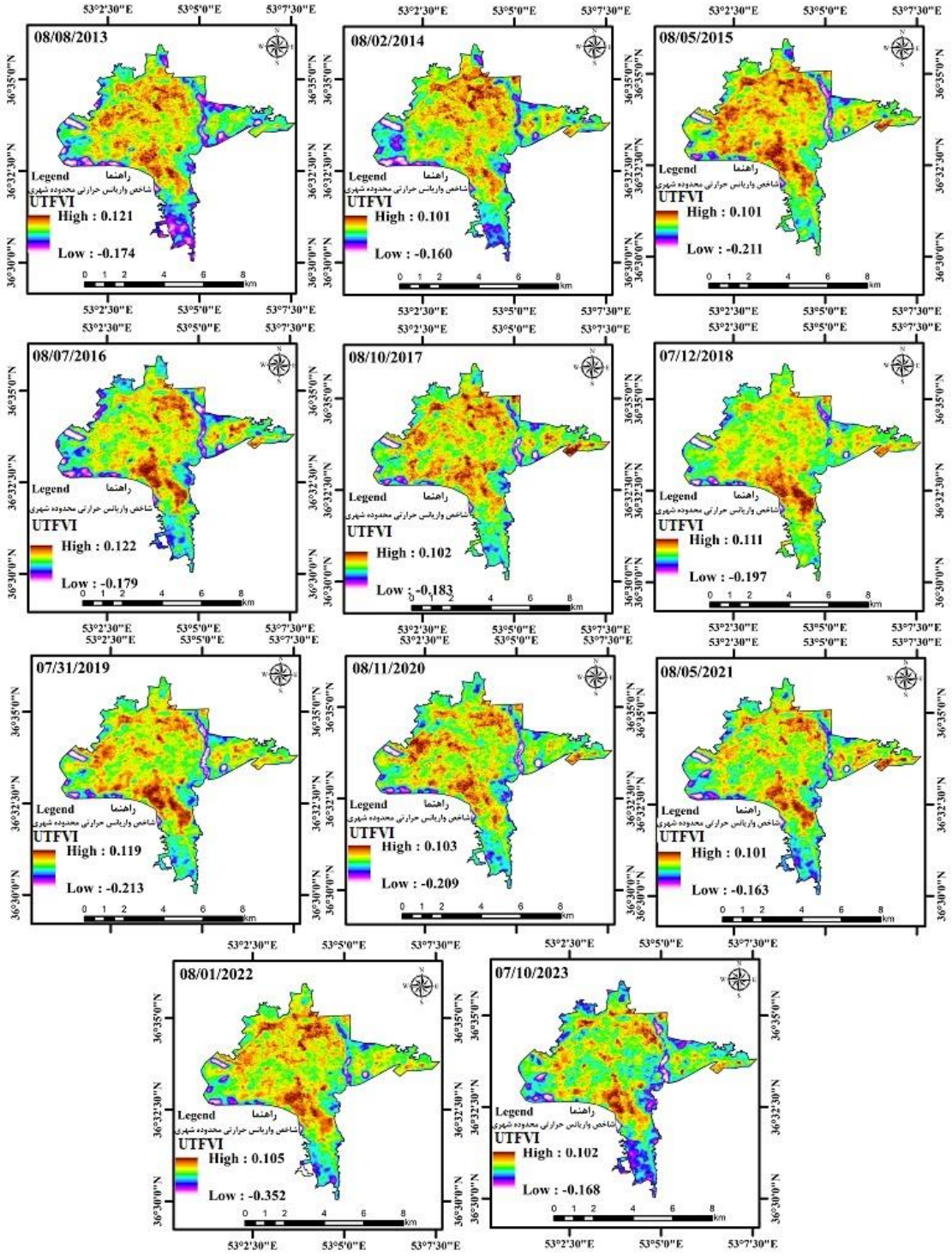
جدول۳- همبستگی بین NDVI و دمای سطح زمین

Table 3- Correlation between NDVI and land surface temperature

شماره	تاریخ	همبستگی
Number	**calendar**	**Correlation**
1	August 8, 2013	-0.68
2	August 2, 2014	-0.65
3	August 5, 2015	-0.55
4	August 7, 2016	-0.63
5	August 10, 2017	-0.62
6	July 12, 2018	-0.66
7	July 31, 2019	-0.52
8	August 11, 2020	-0.52
9	August 5, 2021	-0.61
10	August 1, 2022	-0.57
11	July 10, 2023	-0.54

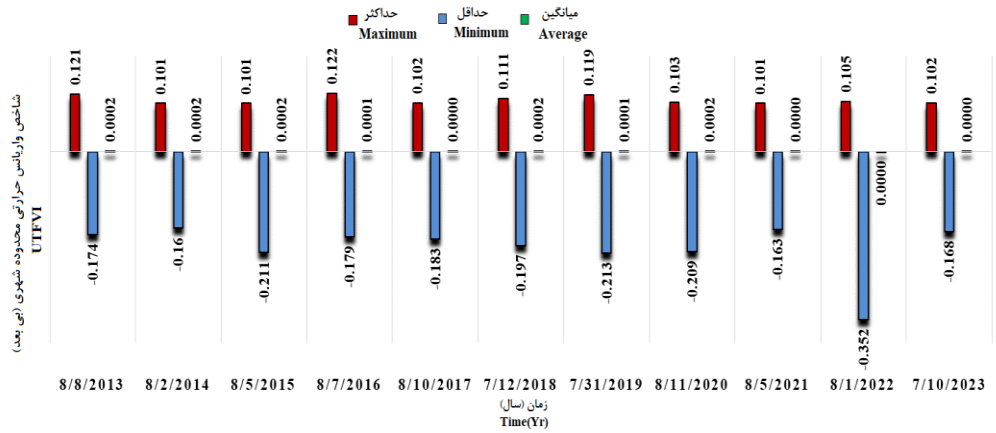
شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری و آسایش حرارتی

شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری محاسبه و طبقه‌بندی آن در محیط نرم افزارArc GIS 10.5 ترسیم شد (شکل۷). کمترین شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری در بازه زمانی ۱۱ ساله در سطح پیکسل مربوط به تاریخ ۱۰ مرداد ماه ۱۴۰۱ برابر با ۰/۳۵۲- و بیشترین میزان آن در تاریخ ۱۷ مرداد ماه ۱۳۹۵ به مقدار ۰/۱۲۲ محاسبه شد. همچنین میانگین این شاخص برای تمامی سال‌ها اعداد بسیار کوچک و نزدیک به صفر را نشان می‌دهد (شکل۸). طبقه‌بندی آسایش حرارتی نشان داد که طبقه عالی آسایش حرارتی در ۱۹ تیرماه ۱۴۰۲ دارای بیشترین پهنه به وسعت ۱۶۸۵/۵۷ هکتار و طبقه بدترین آسایش در همان تاریخ دارای کمترین مساحت به میزان ۱۱۱۷/۹۸ هکتار بوده است. طبقه عالی آسایش همچنین در ۱۴ مرداد ۱۳۹۴ دارای کمترین پهنه یعنی ۱۵۲۰/۸۵ هکتار بوده، ولی طبقه بدترین آسایش در ۱۷ مرداد ۱۳۹۲ دارای بیشترین پهنه به وسعت ۱۴۹۸/۶۸ هکتار بوده است (شکل۹، جدول۴، شکل ۱۰). با توجه به آنکه روند کلی افزایش دما در طول دوره آماری نسبتا صعودی بوده ولی با استخراج شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری که یک شاخص سنجش از دور برای بررسی تغییرات فضایی دمای سطح در نواحی شهری می‌باشد، می‌توان دریافت که پهنه‌های آسایش حرارتی در طبقه نرمال، خوب و عالی در طول دوره زمانی ۱۱ ساله گسترش داشته و یک دوگانگی را ایجاد کرده، که با افزایش دما چگونه امکان گسترش پهنه آسایش حرارتی وجود دارد، که علت را باید در معادله شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری جستجو کرد. در معادله شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری دمای سطح زمین در مقیاس پیکسل و میانگین دمای سطح زمین محدوده شهری دو عامل تاثیر گذار می‌باشند. به طوری که هر چه دمای سطح زمین در سطح پیکسل مقادیر کمتری نسبت به میانگین کل دمای سطح زمین در محدوده شهری داشته باشد آسایش حرارتی در طبقه عالی تا نرمال قرار می‌گیرد و هرچه دمای سطح زمین در سطح پیکسل مقادیر بیشتری نسبت به میانگین کل دمای سطح زمین را نشان دهد، آسایش حرارتی در طبقه بد، بدتر و بدترین قرار می‌گیرد. از سوی دیگر هر چه اختلاف مقادیر بین دمای سطح زمین در مقیاس پیکسل و میانگین دمای سطح زمین در محدوده شهری بیشتر باشد، طبقه آسایش حرارتی از طبقه نرمال به طبقه عالی‌ترین و بدترین از منظر آسایش حرارتی میل می‌کند. ولی به طور کلی شاخص واریانس حرارتی محدوده شهر ساری در دو منطقه (شمال شرقی و مرکزی متمایل به جنوب) در طول ۱۱ سال آماری تغییرات عددی محسوس و رو به رشدی را از لحاظ آسایش نشان نداده و همیشه در ضعیف‌ترین حالت خود قرار داشته، که این خود نشان دهنده تخریب تدریجی سکونتگاه شهری در این محدوده از لحاظ زیست شهری می باشد.



شکل ۷- شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری در شهر ساری (۲۰۱۳-۲۰۲۳)

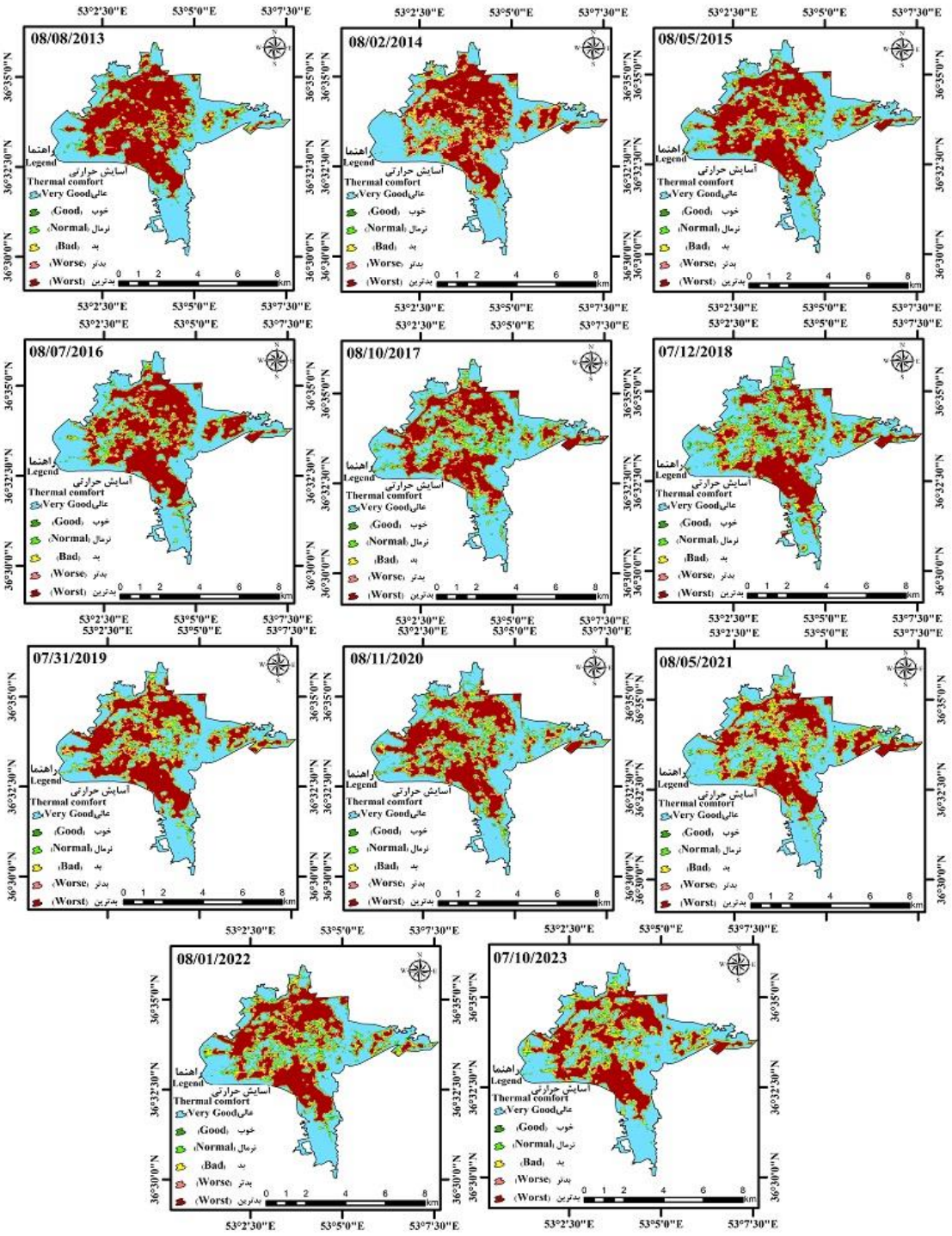
Fig.7. urban thermal field variance index in Sari city (2013-2023)



شکل ۸- نمودار حداقل، حداکثر و میانگین شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری در ساری (دوره ۲۰۲۳-۲۰۱۳)

Fig.8. Graph of minimum, maximum and average urban thermal field variance index in Sari city (2013-2023)

نتایج این پژوهش با یافته‌های اصغری سراسکانرود و اسدی (Asghari Sarasekanrood & Asadi, 2021)، خدمت‌زاده و همکاران (Khedmatzadeh et al., 2021) ، مارسل و ویللوت (Marcel & Villot, 2021) ، اسماعیلی (Esmaeeli, 2022) ، موازنامن و همکاران (Moazzamn et al., 2022) و عظیمی و همکاران (Azimi et al., 2023) از آن جهت که افزایش تغییرات پوشش گیاهی بر میزان دمای سطح زمین و جزایر حرارتی شهری اثر گذار بوده و رابطه معکوس وجود دارد، دارای مطابقت است. همچنین استخراج شاخص واریانس محدوده شهری استخراج شده و ترسیم پهنه آسایش حرارتی به سبب راحتی در ارائه نتایج و تقسیر و تحلیل تا حد زیادی با پژوهش‌های احمد (Ahmed, 2018)، جوماری و همکاران (Jumari et al., 2023) و کیکون و همکاران (Kikon et al., 2023) همخوانی و تطابق دارد.



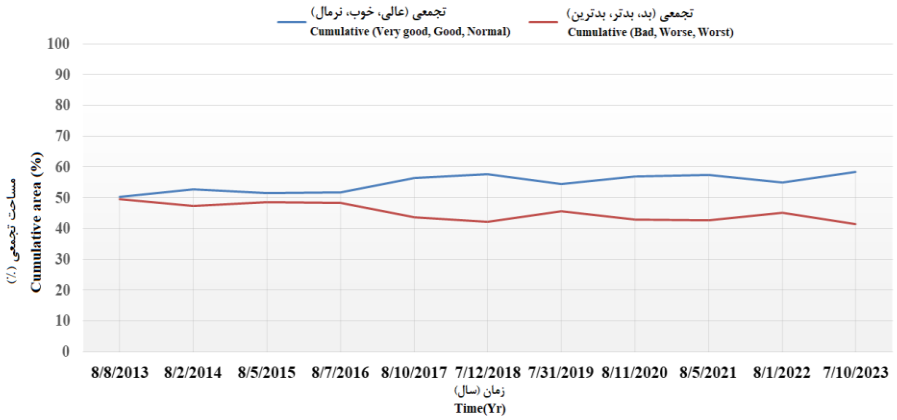
شکل ۹- طبقه‌بندی آسایش حرارتی براساس شاخص واریانس حرارتی محدوده شهر ساری (۲۰۱۳-۲۰۲۳)

Fig.9. Thermal comfort classification based on the urban thermal field variance index in Sari city (2013-2023)

جدول ۴- وسعت طبقات کیفی پهنه‌های آسایش حرارتی شهر ساری (۲۰۱۳-۲۰۲۳)

Table 4- The extent of the quality classes of thermal comfort zones in Sari city (2013-2023)

تاریخ Calendar	مساحت Area	طبقه Class					
		عالی Very good	خوب Good	نرمال Normal	بد Bad	بدتر Worse	بدترین Worst
17 مرداد 1392 August 8, 2013	هکتار(Hectar)	1536.24	116.83	117.90	125.54	118.81	1498.68
	٪	43.72	3.32	3.36	3.57	3.38	4265
10 مرداد 1393 August 2, 2014	هکتار(Hectar)	1547.98	146.96	159.61	167.49	176.60	1315.36
	٪	44.05	4.18	4.54	4.77	5.03	37.43
14 مرداد 1394 August 5, 2015	هکتار(Hectar)	1525.85	137.19	144.32	159.76	167.66	1379.22
	٪	43.42	3.90	4.11	4.55	4.77	39.25
17 مرداد 1395 August 7, 2016	هکتار(Hectar)	1560.31	122.51	136.07	139.39	150.39	1405.33
	٪	44.40	3.49	3.87	3.97	4.28	39.99
19 مرداد 1396 August 10, 2017	هکتار(Hectar)	1642.79	167.87	168.39	179.77	175.80	1182.38
	٪	46.75	4.78	4.79	5.03	5	33.65
21 تیر 1397 July 12, 2018	هکتار(Hectar)	1612.35	217.61	199.53	220.83	195.02	1068.66
	٪	45.88	6.19	5.68	6.28	5.55	30.41
9 مرداد 1398 July 31, 2019	هکتار(Hectar)	1582.33	155.47	175.30	166.06	160.64	1274.04
	٪	45.03	4.42	4.99	4.73	4.57	36.26
21 مرداد 1399 August 11, 2020	هکتار(Hectar)	1645.54	175.57	182.61	176.51	165.68	1168.09
	٪	46.83	5	5.20	5.02	4.71	33.24
14 مرداد 1400 August 5, 2021	هکتار(Hectar)	1641.90	184.83	189.85	195.96	170.50	1130.96
	٪	46.72	5.26	5.40	5.58	5.85	32.18
10 مرداد 1401 August 1, 2022	هکتار(Hectar)	1567.96	175.98	185.96	192.39	180.81	1210.90
	٪	44.62	5.01	5.29	5.47	5.15	33.46
19 تیر 1402 July 10, 2023	هکتار(Hectar)	1685.57	183.98	185.91	181.85	185.71	1117.98
	٪	47.97	5.24	5.29	5.18	4.52	31.82



شکل ۱۰- درصد مساحت تجمعی آسایش حرارتی شهر ساری (دوره ۲۰۲۳-۲۰۱۳)

Fig.10. Percentage of Cumulative area thermal comfort in Sari city (2013-2023)

نتیجه گیری

دمای سطح زمین یک شاخص مرجع برای بررسی تاب‌آوری زیست شهری محسوب می‌شود. به طوری که افزایش این عامل باعث ایجاد مشکلاتی از لحاظ تامین منابع آب، برق، آلودگی هوا، تشدید بیماری‌ها، کیفیت زندگی، کسب و کار و غیره می‌شود. با گسترش روش‌های نوین پایش و ارزیابی دمای سطح زمین تا حد زیادی می توان این تغییرات را مورد بررسی قرار داد. مطالعه دما و آسایش حرارتی و عوامل اثر گذار بر آن‌ها، نگرش‌های ارزشمندی را برای تجزیه و تحلیل محیط شهری و همچنین کمک به فرآیندهای تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی در جهت رسیدن به توسعه پایدار شهری را فراهم می‌کند. روش‌های سنجش از دوری یکی از این روش‌هاست که، به واسطه دقت قابل قبول آن، در این پژوهش برای بررسی دمای سطح زمین و شاخص واریانس حرارتی محدوده شهری که کیفیت سلامت شهری و بوم‌شناسی را از نظر درجه حضور آسایش حرارتی در محیط در شهر ساری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ استخراج دمای سطح زمین برای یک دوره زمانی ۱۳ ساله استخراج شد، که با تبعیت از آن نقشه آسایش حرارتی ترسیم گردید. با توجه به روند کلی افزایش دمای محدوده شهری و تغییرات اقلیمی لزوم توجه به نوع ساخت و سازها، تغییر کاربری اراضی، ایجاد و گسترش پوشش سبز مانند پارک‌ها و بوستان‌ها تا حد زیادی می‌تواند در جهت کاهش دمای سطح زمین موثر باشد. همچنین می توان دریافت علاوه بر عامل پوشش گیاهی عوامل دیگری نیز مانند شدت تابش خورشیدی، ابری بودن، تعداد و حجم تردد وسایل نقلیه، استفاده از وسایل سرمایشی و برودتی، استفاده از انرژی الکتریکی همگی بر میزان تغییرات دمای سطح زمین در محیط شهری موثر بوده که توجه به آن‌ها در راستای مدیریت شهری نیل به توسعه پایدار را تسهیل می‌کند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

حامی مالی

حامی مالی این اثر دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری می باشد.

سپاسگزاری

نویسندگان از تمامی کسانی که در انجام این پژوهش همفکری داشتند و بنحوی یاری نمودند، تشکر و قدردانی می‌کنند.

References

Aghdar, H., Shayesteh, K., Mohammadyari, F., & Rangzan, K. (2020). Evaluation of spatial distribution of earth surface temperature in Behbahan during 2000 - 2014 period using thermal remote sensing. *Human Geography Research*, *52*(3), 817-832. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jhgr.2019.236547.1007487

Ahmed, S. (2018). Assessment of urban heat islands and impact of climate change on socioeconomic over Suez Governorate using remote sensing and GIS techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, *21*(1), 15-25. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.08.001

Al Rakib, A., Ayan, S. M., Orthy, T. T., Sarker, O., Intisar, L., & Arnob, M. A. (2020). In Depth-Analysis of Urban Resident-Satisfaction Level of Mirpur. Dhaka, Bangladesh: A Participatory Approach. *In Proceedings of the 1st International Student Research Conference*. Dhaka, Bangladesh.

Asghari Sarasekanrood, S., & Asadi, B. (2021). Analysis of land use changes and their effects on the creation of thermal islands in Isfahan City. *The Journal of Geographical Research on Desert Areas*, *8*(2), 217-246. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.2345332.1399.8.2.9.6

Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*, *2016*(1), 1-8. https://doi.org/10.1155/2016/1480307

Azimi, E., Akbari, R., & Armin, M. (2023). Explaining the Relationship between Thermal Islands and a Number of Morphological Factors of the City Using Remote Sensing and GIS (Case Study: Ahvaz*)*. *Journal of Geography and Environmental Studies*, *11*(44), 42-57. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087845.1401.11.44.3.6

Esmaeeli, S. (2022). The application of thermal remote sensing and GIS in the assessment of the spatial distribution of land surface temperature in urban environments (The case of study of Tabriz city). *Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, *2*(3), 1-23. [In Persian] https://jzpm.marvdasht.iau.ir/article_3992.html

Guha, S., Govil, H., Dey, A., & Gill, N. (2018). Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing*, *51*(1), 667–678. https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1474494

Hashemi, S. M., Alavipanah, S. K., & Dinarvandi, M. (2013). LST assessment using thermal remote sensing in urban environment. *Journal of Environmental Studies*, *39*(1), 81-92. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jes.2013.30392

Jumari, N. A. S. K., Ahmed, A. N., Huang, Y. F., Ng, J. L., Koo, C. H., Chong, K. L., ... & Elshafie, A. (2023). Analysis of urban heat islands with landsat satellite images and GIS in Kuala Lumpur Metropolitan City. *Heliyon*, *9*(8). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18424

Kafy, A. A., Al Rakib, A., Akter, K. S., Jahir, D. M. A., Sikdar, M. S., Ashrafi, T. J., ... & Rahman, M. M. (2021). Assessing and predicting land use/land cover, land surface temperature and urban thermal field variance index using Landsat imagery for Dhaka Metropolitan area. *Environmental Challenges*, *4*, 100192. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100192

Kafy, A. A., Rahman, M. S., Islam, M., Al Rakib, A., Islam, M. A., Khan, M. H. H., ... & Sattar, G. S. (2021). Prediction of seasonal urban thermal field variance index using machine learning algorithms in Cumilla, Bangladesh. *Sustainable Cities and Society*, *64*, 102542. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102542

Kamyabi, S., & Abdi, K. (2020). Detection and analysis of the trend of climate change (precipitation and temperature) within the boundaries of Sari. *Journal of Environmental Science and Technology*, *7*(22), 165-179. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jest.2019.43898.4642

Khedmatzadeh, A., Mousavi, M., Mohamadi Torkamani, H., & Mohammadi, M. S. (2021). An Analysis of Land Use Changes and Thermal Island Formation in Urmia City exclusion Using Remote Sensing. *Regional Planning*, *11*(41), 119-134. [In Persian] https://dx.doi.org/10.30495/jzpm.2021.3965

Khosravi, Y., Heidari, M. A., Tavakoli, A., & Zamani, A. A. (2017). Analyzing of the Relationship Between Land Surface Temperature Temporal Changes and Spatial Pattern of Land Use changes. *The Journal of Spatial Planning*, *21*(3), 119-144. [In Persian] http://hsmsp.modares.ac.ir/article-21-4560-fa.html

Kikon, N., Kumar, D., & Ahmed, S. A. (2023). Quantitative assessment of land surface temperature and vegetation indices on a kilometer grid scale. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(49), 107236-107258. https://doi.org/10.1007/s11356-023-27418-y

Mahmoudzadeh, H., Naghdbishi, A., & Momeni, S. (2018). The Impact of Urban Use on Creation of Thermal Islands (Case Study: Mashhad City). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *7*(3), 105-119. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.68150

Mansourmoghaddam, M., Rousta, I., Zamani, M. S., Mokhtari, M. H., Karimi Firozjaei, M., & Alavipanah, S. K. (2023). Investigating and Modeling the Effect of the Composition and Arrangement of the Landscapes of Yazd City on the Land Surface Temperature Using Machine Learning and Landsat-8 and Sentinel-2 Data. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, *15*(3), 1-26. [In Persian] https://doi.org/10.48308/gisj.2023.102195

Marcel, C., & Villot, J. (2021). Urban Heat Island index based on a simplified micro scale model. *Urban Climate*, *39*, 100922. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100922

Moazzam, M. F. U., Doh, Y. H., & Lee, B. G. (2022). Impact of urbanization on land surface temperature and surface urban heat Island using optical remote sensing data: A case study of Jeju Island, Republic of Korea. *Building and Environment*, *222*, 109368. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109368

Nikpour, A., & Yarahmadi, M. (2022). Measurement and evaluation of urban sprawl (Case study: Sari city). *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*, *10*(2), 189-204. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2022.336711.1643

Niliyeh Brojeni, M., & Ahmadi Nadoushan, M. (2019). The relationship between urban vegetation and land surface temperature in Isfahan city using Landsat TM and OLI satellite images and LST index. *Environmental Sciences*, *17*(4), 163-178. [In Persian] https://doi.org/10.29252/envs.17.4.163

Pouramin, K., Khatami, S. M., & Shamsodini, A. (2020). Effective Factors of Forming Urban Heat Islands; With an Emphasis on Urban Design Challenges and Features. *Urban Design Discourse-a Review of Contemporary Litreatures and Theories*, *1*(1), 69-83. [In Persian] http://udd.modares.ac.ir/article-40-35601-fa.html

Sejati, A. W., Buchori, I., & Rudiarto, I. (2019). The spatio-temporal trends of urban growth and surface urban heat islands over two decades in the Semarang Metropolitan Region. *Sustainable Cities and Society*, *46*, 101432. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101432

Shahinejad, B., & Dehghani, R. (2016). Application of Wavelet Neural Network for Estimation of Mean Daily Temperature in Sari Area. *Journal of Climate Research, 1395*(27), 75-86. [In Persian] https://clima.irimo.ir/article_54786.html

Shakiba, A., Firoozabadi, P., Ashourloo, D., & Namdari, S. (2009). Analysis of relationship between land use/cover and urban heat island, using ETM+. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, *1*(1), 39-56. [In Persian] https://gisj.sbu.ac.ir/article_94232.html

Sobrino, J. A., Caselles, V., & Becker, F. (1990). Significance of the remotely sensed thermal infrared measurements obtained over a citrus orchard. *ISPRS Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, *44*, 343-354. https://doi.org/10.1016/0924-2716(90)90077-O

Sobrino, J. A., Jimenez, M., & Paolinib, C. J. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM5. *Remote Sensing of Environment*, *90*, 434-440. https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003

Tomlinson, C. J., Chapman, L., Thornes, J. E., & Baker, C. J. (2011). Including the urban heat island in spatial heat health risk assessment strategies: a case study for Birmingham, UK. *International Journal of Health Geographics*, *10*(42), 1-14. https://doi.org/10.1186/1476-072x-10-42

Walsh, J., Wuebbles, D., Hayhoe, K., Kossin, J., Kunkel, K., Stephens, G., ... & Somerville, R. (2014). *Our changing climate. In: U.S. Government Printing. Climate change impacts in the United States*. Washington D.C.: U.S. Government Printing. http://dx.doi.org/10.7930/J0KW5CXT

Wang, H., Zhang, Y., Tsou, J. Y., & Li, Y. J. S. (2017). Surface urban heat island analysis of Shanghai (China) based on the change of land use and land cover. *Sustainability*, *9*(9), 1538. https://doi.org/10.3390/su9091538

Vol.14, No.2, Summer 2025, p.145-172 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2025.92002.1546 OPEN ACCESS

Investigating and Identifying of Suitable Point for Installing Low-Cost Sensors in IoT Monitoring of Urban Air Pollution

Masoud Ebrahimi Ghadi,[1] Ahmad Nohegar [2*], Zeinab Sazvar[3], Mahmoud Behrouzi[4]

[1]Department of Environmental Engineering, Air Pollution, Faculty of Environment, Kish International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran
[2]Department of Disaster Engineering, Education and Environmental Systems, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran
[3]Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
[4]Department of Environmental Hazards, Marine Science Research Institute, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 03 February 2025

Revised: 07 May 2025

Accepted: 13 May 2025

Available Online: 14 May 2025

Keywords:

Particulate Matter (PM2.5 and PM10)

Fuzzy Logic and Membership Functions

Moran's I Spatial Autocorrelation

Geographically Weighted Regression (GWR)

Urban Air Pollution – Tehran

ABSTRACT

The use of low-cost sensors based on the Internet of Things (IoT) has become a novel approach in urban air pollution monitoring. This study aimed to determine the optimal placement of such sensors in Tehran using a multi-criteria decision-making (MCDM) method. Eleven sub-criteria were identified under two main criteria: air pollution levels and pollution sources. Each sub-criterion was mapped as a digital layer in a GIS environment. These layers were then integrated using overlay operators, and the optimal operator was selected based on Ordinary Least Squares (OLS) regression. Spatial clusters were identified using the Hot Spot Analysis and Moran's I statistics. Geographically Weighted Regression (GWR) was used for sensitivity analysis between the sub-criteria and the final suitability map. Results indicated that PM10 and PM2.5 concentrations, and proximity to transportation terminals and fuel stations, were the most influential sub-criteria, with membership weights of 0.170, 0.151, 0.139, and 0.113, respectively. The OLS model showed that the SUM operator had the strongest correlation with the sub-criteria. GWR analysis produced high model accuracy (AICc = 4484, R^2 = 0.98). The final suitability map revealed that 13% of Tehran's area is highly suitable and 17% is moderately suitable for sensor installation, mostly located in the central, southern, and southwestern zones, where pollution levels are highest.

* Corresponding author: Dr. Ahmad Nohegar E-mail address: Nohegar@ut.ac.ir

How to cite this article: Ebrahimi Ghadi, M., Nohegar, A., Sazvar, Z., & Behrouzi, M. (2025). Investigating and Identifying of Suitable Point for Installing Low-Cost Sensors in IoT Monitoring of Urban Air Pollution. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 14*(2), 145-172. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.92002.1546

©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 monitoring of air pollutants by the traditional method is very expensive, and complete citywide coverage is practically impossible. In this situation, it is possible to switch to low-cost sensors. With a cost of less than $1,000 per sensor package, compared to multi-million-dollar reference monitoring stations, this solution is economical and feasible at the city scale. One of the key issues related to sensors is their precise spatial location and distribution within the city. By identifying optimal points for installing sensors, it is possible to provide comprehensive air pollution coverage in Tehran. The present research was conducted with the aim of identifying suitable points for installing low-cost air pollution sensors in Tehran using geostatistical methods combined with geographic models.

Material and Methods

The present study was conducted in the urban area of Tehran. The required information includes data on the concentration of air pollutants and the identification of pollution sources. The concentration of air pollutants at air quality monitoring stations in Tehran is measured on a daily basis. In this research, data related to the concentration of gases (NO_2, SO_2, CO, and O_3) and suspended particles (PM10 and PM2.5) were collected from 24 air quality monitoring stations in Tehran on an hourly basis during the years 2013 to 2023 (1392 to 1402). After reviewing scientific literature, 11 sub-criteria were identified under 2 main criteria for sensor placement. Based on the mentioned sources, a digital layer was prepared for each sub-criterion in ArcGIS Pro. These layers were classified by importance using the Reclassify tool in GIS. For superimposing layers and identifying suitable sensor locations, the layers were fuzzified using the Large and Small membership tools. As a result, 11 fuzzy layers were generated. To determine the relative importance of each sub-criterion and its effectiveness compared to others, the Analytic Network Process (ANP) was used. The resulting weights were multiplied by each raster using the Raster Calculator in ArcGIS Pro, producing a weighted fuzzy map for each sub-criterion. These maps were then superimposed using fuzzy operators including AND, OR, SUM, PRODUCT, and GAMMA (0.9, 0.7, and 0.5).

To identify the best operator, Ordinary Least Squares (OLS) regression was applied. Sub-criteria were treated as independent variables, while the map resulting from each operator was treated as the dependent variable. The operator with the highest correlation coefficient was selected as the final method for layer combination. To investigate the spatial distribution pattern of suitable sensor locations, Moran's I autocorrelation and Hot Spot Analysis were conducted in ArcGIS Pro. In the final stage, the spatial relationship between the 11 sub-criteria (independent variables) and the final suitability map (dependent variable) was analyzed using Geographically Weighted Regression (GWR).

Results and Discussion

The results showed that PM concentrations were the most important factor in selecting sensor locations, as these particles indicate both the intensity and spatial extent of pollution. Following PM, urban transportation stations including terminals, bus, and taxi stations were ranked second in importance.

Regression results showed that the SUM operator had the best performance based on regression coefficients and the coefficient of determination. The correlation between the SUM map and the sub-criteria was significant, confirming the SUM operator as the best option for the final map. Therefore, the final SUM map was adopted to assess suitability of land in Tehran for low-cost sensor installation.

Analysis of spatial distribution patterns showed a Moran's I value of 0.532, indicating strong spatial autocorrelation and a clustered pattern. The Z-score and p-value (0.000) confirmed the clustering pattern. Cold spots (blue) represent low suitability, while hot spots (red) identify highly suitable areas for sensor installation. These red zones are concentrated in southern Tehran, while blue zones are in northern, northeastern, and northwestern areas.

The hotspot model confirmed Moran's index, verifying clustered spatial suitability. Evaluation of the GWR model confirmed its accuracy and reliability, with an AIC of 4484 and $R^2 = 0.98$. Approximately 16 hectares of suitable land were identified in central, southern, southwestern, and in some cases northern Tehran—particularly near highways, gas stations, transportation terminals, and industrial centers.
Based on the final maps, sub-criteria analysis, and field verification, 44 specific locations in Tehran were identified as optimal sensor sites. A distribution map of these points was prepared for implementation.

Conclusion

Low-cost monitoring stations in urban areas can provide valuable insights into spatial patterns of air pollution. These online and affordable systems are viable given the availability of low-cost monitors, which can either be mounted on existing infrastructure or distributed across the city. However, the data generated from these systems must be properly evaluated and validated.
A strategically placed network of such monitors allows for dense spatial coverage, offering a cost-effective and reliable alternative to traditional monitoring networks. Lands located at least 200 meters away from pollution sources, where pollution levels are low, are unsuitable for sensor installation. Approximately 20%, 20%, and 29% of Tehran's land was classified as marginally unsuitable, unsuitable, and completely unsuitable, respectively. Nevertheless, 44 highly suitable locations were identified, mostly in central, southern, and southwestern Tehran. Each sensor package costs about $900, making the total implementation cost $400,000 (approximately 20 billion IRR) significantly lower than the 80 billion IRR required for a single traditional monitoring station. Thus, low-cost sensors offer a highly economical solution for air pollution monitoring in Tehran.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۱۷۲-۱۴۵

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2025.92002.1546 دسترسی آزاد

بررسی و شناسایی نقاط مناسب جهت نصب حسگرهای کم‌هزینه در پایش برخَط آلودگی هوای شهری

مسعود ابراهیمی قادی[۱]، احمد نوحه‌گر*[۲]، زینب سازور[۳] محمود بهروزی[۴]

[۱] گروه مهندسی محیط‌زیست، گرایش آلودگی هوا، دانشکده محیط‌زیست،پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۲] گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۳] گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۴] گروه مخاطرات محیطی، پژوهشکده علوم دریایی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳

کلمات کلیدی:

ذرات معلق (PM2.5 و PM10)

منطق فازی و توابع عضویت

همبستگی فضایی شاخص موران

رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR)

آلودگی هوای شهری – تهران

چکیده

استفاده از حسگرهای کم‌هزینه مبتنی بر اینترنت اشیا به روشی نوین برای پایش آلودگی هوای شهری تبدیل شده است. این پژوهش با هدف تعیین مکان بهینه نصب این حسگرها در شهر تهران انجام شد و از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بهره گرفت. یازده زیرمعیار در دو معیار اصلی «میزان آلودگی» و «منابع آلاینده» شناسایی و برای هرکدام لایه‌ای رقومی در محیط GIS تولید شد. ترکیب لایه‌ها با عملگرهای مختلف انجام شد و به کمک رگرسیون OLS عملگر بهینه (SUM) انتخاب گردید. برای شناسایی الگوهای فضایی، شاخص‌های موران و هات‌اسپات به کار رفت. همچنین، برای تحلیل حساسیت ارتباط زیرمعیارها با نقشه نهایی، از رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) استفاده شد. نتایج نشان داد که زیرمعیارهای غلظت PM10 ، PM2.5 فاصله از پایانه‌های حمل‌ونقل و جایگاه‌های سوخت، بیشترین تأثیر را در جانمایی دارند. خروجی مدل GWR با AICc برابر ۴۴۸۴ و ضریب تعیین ۰.۹۸، دقت بالای مدل را نشان داد. نقشه نهایی مکان‌یابی نشان داد که ۱۳٪ از اراضی تهران کاملاً مناسب و ۱۷٪ مناسب برای نصب حسگرها هستند. این مناطق عمدتاً در مرکز، جنوب و جنوب‌غرب تهران واقع شده‌اند؛ جایی که آلودگی هوا و منابع آلاینده متمرکزتر است.

* نویسنده مسئول: دکتر احمد نوحه‌گر
E-mail: nohegar@ut.ac.ir

مقدمه

با وجود تلاش‌های مداوم مقامات دولتی، کیفیت هوا همچنان یکی از نگرانی‌های اصلی برای سلامت انسان است. شواهدی از کاهش بار آلودگی و بهبود کیفیت هوا ناشی از قرنطینهٔ همه‌گیری کرونا، بیان‌گر تأثیر فعالیت‌های انسانی در تشدید آلودگی محیط-زیست است (Toscano & Murena, 2020). بسیاری از ویروس‌های مزمن و سرطانی توسط غبارهای شهری- صنعتی پخش می‌شوند (Schwela et al., 2012). به این ترتیب، نظارت بر کیفیت هوا برای مدیریت محیط‌زیست شهری و بهداشت بسیار حائز اهمیت است که در چارچوب‌های قانونی تنظیم می‌شود (WHO, 2021). معمولاً این چارچوب‌ها به ایستگاه‌های پایش پُرهزینه که نیاز به نگهداری و کالیبراسیون مداوم دارند، متکی است. این شرایط در همه‌جا باعث استقرار شبکهٔ پراکنده از این ایستگاه‌ها شده است که قادر به مقابله با تغییرات مکانی- زمانی بالا و اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ها نیستند (UNION, 2008) . استقرار و نگهداری تعداد زیادی از این شبکه‌های پایش ثابت هوا بسیار پُرهزینه است. حداقل ۱۰ هزار دلار برای هر ایستگاه، بدون احتساب هزینه‌های نصب و نگهداری نیاز است. همچنین این ایستگاه‌های پایش عموماً در مناطقی که فعالیت‌ها و جمعیت‌های انسانی متمرکز هستند، قرار ندارند. کنار جاده‌ها و مناطق ترافیکی نیز بسیار دور از ایستگاه‌های اندازه‌گیری هستند که ممکن است بر دقت تخمین توزیع فضایی آلاینده‌ها در مناطق شهری تأثیر بگذارد. برای رسیدگی به این چالش‌ها، اخیراً توجه به استفاده از واحدهای سنجش آنلاین و کم‌هزینه معطوف شده است.

در دهه‌های گذشته، مقامات دولتی یک رویکرد یکپارچه برای مدیریت کیفیت هوا اتخاذ کرده‌اند که شامل اندازه‌گیری مستقیم و مدل‌سازی غلظت آلاینده‌ها است. در حالی‌که اندازه‌گیری‌های مستقیم اطلاعات مستقیمی از سطح آلودگی هوا در موقعیت‌های مشخص ارائه می‌کنند. مدل‌های پراکندگی، تصویر جامعی از توزیع آلودگی هوا در سراسر مناطق شهری ارائه می‌دهند. غلظت آلاینده‌ها همیشه توسط شبکه‌های نظارتی پراکنده اندازه‌گیری شده است؛ اما اخیراً حسگرهای ارزان قیمت وارد بازار رقابتی شده است (De Vito, Esposito, Castell, Schneider & Bartonova, 2020). استقرار این حسگرها برای تکمیل پایش‌های نظارتی استفاده می‌شود که تفکیک مکانی خوبی فراهم کرده است. مزیت استفاده از این شبکه‌های حسگر، کسب اطلاعات مکانی-زمانی دقیق‌تری از اندازه‌گیری‌ها با هزینه‌های نصب و عملیاتی کمتر است (Sung, Lee, Kim & Park, 2019). در چندین مطالعه نشان داده شده است که غلظت آلاینده‌های هوا دارای تغییرات فضایی در مقیاس خُرد است که توسط مانیتورهای نظارتی ثبت نمی‌شود (Tan, Lipsky, Saleh, Robinson & Presto, 2014). در شهر پیتسبورگ از ایالات متحده لی و همکاران (Li et al., 2019) گاز NO_2 و در شهر لس‌آنجلس میسکل و همکاران (Miskell et al., 2019) گاز O_3 تغییرات فضایی درون همسایگی زیادی دارند و در نقاط داغ، غلظت آن پنج برابر بیشتر از غلظت پس‌زمینه‌ای است که توسط مانیتورها اندازه‌گیری می‌شود و در میانگین منطقه‌ای، این غلظت‌ها نادیده گرفته می‌شود.

حسگرهای کم‌هزینه برای اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌های هوای شهری، در قالب یک جعبه با ابعاد ۱۰۰×۵۰ سانی‌متر قرار می‌گیرد. حسگرهای لیزری در درون جعبه قرار دارند. یک فن، هوای بیرون را به داخل جعبه مکیده و لیزر پراکنش نور توسط ذرات معلق در هوا را اندازه‌گیری کرده و غلظت ذرات را محاسبه می‌کند (Sayahi, Butterfield & Kelly, 2019). همچنین حسگرهایی برای اندازه‌گیری غلظت گازها وجود دارد که در داخل جعبه قرار می‌گیرد. جعبه بر روی دیوار و یا پایه با ارتفاع ۳ متری از سطح زمین نصب می‌شود. هستهٔ مرکزی، اطلاعات را دریافت کرده و از طریق فضای ابری و اینترنت، اطلاعات را به سرور مرکزی انتقال می‌دهد.

با استفاده از شبکهٔ حسگرهای کم‌هزینه (محرک و ثابت) در یک شهر، تفاوت‌های محله‌ای و فضایی آلاینده در نزدیکی منابع خاص (مانند جاده‌ها) را می‌توان حل کرد؛ می‌توان تا مقیاس خیابان (۱۰۰ متر) نصب کرد که پیش‌بینی‌های مطمئن‌تری از توزیع آلاینده‌های هوا در سطح شهر ارائه دهند (Fattoruso et al., 2015)؛ اما این حسگرها در چه مکان‌هایی نصب شوند تا پوشش کاملی از آلایندگی منطقه و یا شهر داشته باشند؟

ادغام حسگرهای کم‌هزینه با اینترنت اشیا[1] به یک رویکرد عملی برای توسعه شهرهای هوشمند تبدیل شده است. عملکرد یک حسگر ذرات معلق در شهر سانتیاگو شیلی بررسی شد. در جعبهٔ پایش آنلاین، حسگرهای پایش رطوبت نسبی و دما نیز جاگذاری شد. در سه ایستگاه در سطح شهر، حسگرهای کم‌هزینه در نزدیکی مراکز پایش مرجع و فیلترهای نمونه‌گیر ذرات معلق نصب و غلظت ذرات پایش شد. نتایج نشان داد که حسگرهای کم‌هزینه در زمانی که رطوبت نسبی بیش از ۷۵ درصد باشد، غلظت ذرات را بیشتر از ایستگاه مرجع و فیلتر نمونه‌گیر نشان می‌دهد، اما در رطوبت کمتر از ۷۵ درصد، پایش بسیار دقیق بود و همبستگی آن با ایستگاه مرجع و فیلتر ۰/۹۸ بود. بنابراین با مدیریت و کالیبره کردن حسگر در رطوبت بالا می‌توان به حسگرها اعتماد کرد و در سطح شهر برای پایش آلاینده‌های هوا نصب کرد (Tagle et al., 2020).

در شهر تورنتو کانادا، پژوهشگران برای ایجاد پایگاه جامع اطلاعات آلودگی هوای شهری، از ابزارهای چندگانه مانند شبکه حسگرهای کم‌هزینه، داده‌های لیدار، ایستگاه‌های مرجع زمینی و تصاویر ماهواره‌ای سنتینل استفاده کردند؛ آنها نشان دادند که هر یک از این ابزارها دارای معایبی است که استفادهٔ جمعی از آنها می‌تواند محدودیت‌ها را پوشش دهد. اگرچه پایش ماهواره‌ای اطلاعات زیادی را دریافت و عرضه می‌کند، اما در روزهای ابری کارایی ندارد و از طرفی در مقیاس شهری، وضوح مکانی مطلوبی ندارد. به همین دلیل نصب حسگرهای آنلاین این محدودیت‌ها را به‌خوبی پوشش می‌دهد، اما نصب حسگرها در مکان‌های مناسب مستلزم مکان‌یابی بر اساس شاخص‌ها و عوامل موثر است که با روش‌های آماری و تلفیق آن با سیستم اطلاعات جغرافیایی قابل انجام است (Ganji et al., 2023).

قابلیت اطمینان اندازه‌گیری حسگرهای کم‌هزینه بر پایهٔ اینترنت اشیا یک پیش‌نیاز مهم است که نیاز به ارزیابی دقیق عملکرد و کالیبراسیون در مقایسه با پایش مرجع دارد. در شهر آتنِ یونان در تابستان ۲۰۱۹ و زمستان و بهار ۲۰۲۰، پایش آنلاین ذرات معلق توسط حسگرهای کم‌هزینه انجام شد که نتایج نشان داد اطلاعات به‌دست‌آمده همبستگی ۰/۹۸ درصد با پایش مرجع دارند که می‌توان به نتایج آن اعتماد کرد. حسگرهای کم‌هزینه برای اندازه‌گیری غلظت ذرات معلق در هوای محیطی آپارتمان‌های مسکونی نیز قابلیت استفاده دارد که در آپارتمان‌های شهر پکن در چین غلظت $PM_{2.5}$ در مقیاس یک‌دقیقه‌ای با حسگرهای کم‌هزینه اندازه‌گیری شد و علاوه بر پایش صحیح غلظت ذرات، می‌توان منابع تولید این ذرات را نیز شناسایی کرد (Shen et al., 2021).

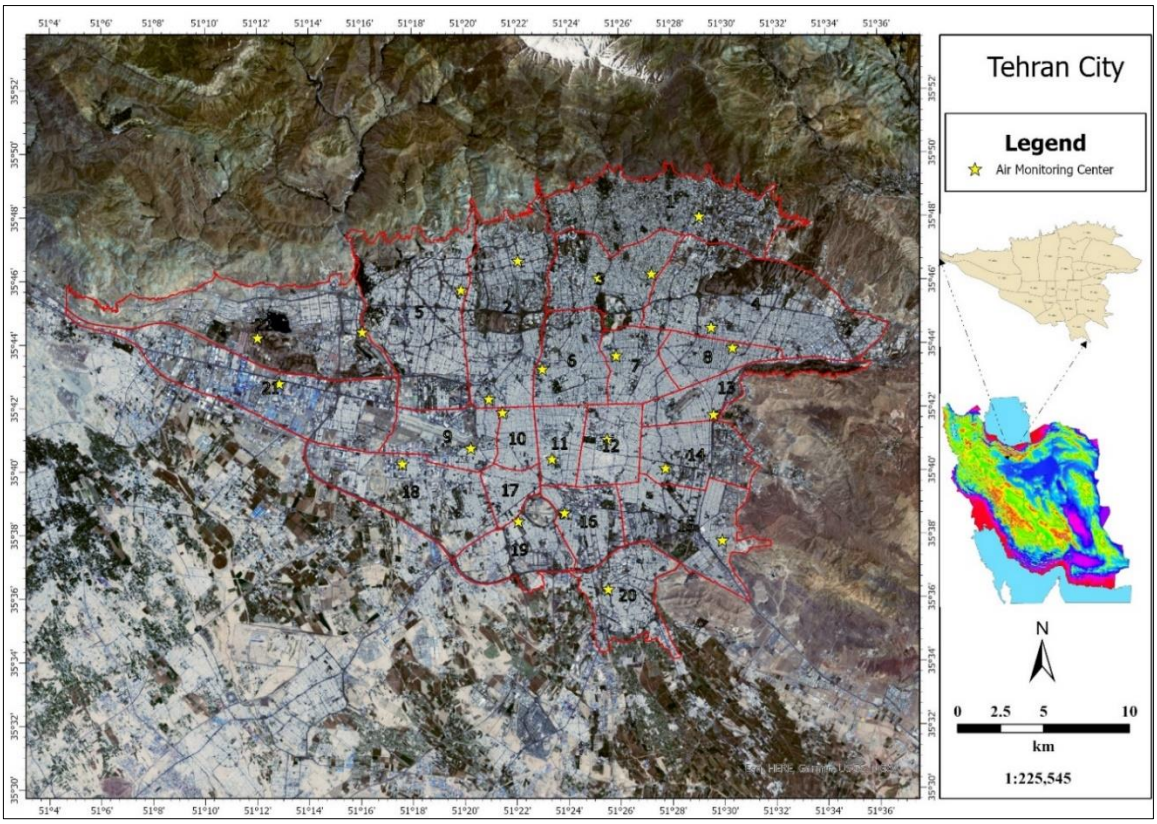
آلودگی هوا در تهران به موضوعی بحث‌برانگیز تبدیل شده است که کنترل آن یکی از مهم‌ترین مباحث مدیریت شهری است. در دو دههٔ اخیر به‌دلیل انفجار جمعیتی و افزایش روزافزون وسایل نقلیه و همچنین تمرکز صنایع به‌ویژه در مناطق جنوبی و جنوب‌غربی، تهران را با بحران آلودگی هوا مواجه کرده است. برای مدیریت و کنترل آلودگی هوا، پایش آن در توزیع فضای جغرافیایی شهر بسیار حائز اهمیت است و می‌توان با اندازه‌گیری و پایش مداوم، منابع آلودگی را شناسایی و دسته‌بندی نمود. سپس راهکارهای عملیاتی و مدیریتی برای آن تهیه کرد؛ اما پایش آلاینده‌های هوا به روش مرجع و سنتی، بسیار گران‌قیمت است و پوشش کامل شهر عملاً غیرممکن است. در این شرایط، می‌توان به حسگرهای کم‌هزینه روی آورد و با هزینهٔ کمتر از ۱۰۰۰ دلار برای هر پکیجِ حسگر در مقایسه با ایستگاه‌های پایشِ مرجع چند میلیون دلاری، شهر را از لحاظ میزان آلودگی پوشش داد؛ اما چالش اصلی حسگرها، دقت اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ها است که در ایستگاه‌های مرجع خطای اندازه‌گیری بسیار کمتر از پایش آنلاین توسط حسگرها است. البته افزایش دقت اندازه‌گیری در حسگرها با استفاده از روش‌های آماری و مدل‌های رگرسیونی انجام می‌گیرد، ولی باز هم دقت آن به اندازهٔ ایستگاه‌های مرجع نیست. یکی دیگر از مسائل مربوط به حسگرها، مکان‌یابی و توزیع فضایی دقیق آنها در سطح شهر است. با شناسایی نقاط بهینه برای نصب حسگرها، می‌توان پوشش کاملی از آلودگی هوای شهر تهران ارائه کرد.

1 - IoT

اگرچه حسگرهای سیار بر روی اتوبوس‌هاس شهری نصب می‌شود، اما با توجه به سطح آلودگی زیاد شهر تهران و منابع عظیم آلایندگی در شهر، پژوهش حاضر با هدف شناسایی نقاط مناسب برای نصب حسگرهای کم‌هزینه برای آلودگی هوای شهر تهران انجام شد و از روش‌های زمین‌آمار و تلفیق آن با مدل‌های جغرافیایی استفاده گردید. بنابراین پژوهش حاضر سعی در شناسایی مکان‌های مناسب برای نصب حسگرهای کم‌هزینه دارد تا بتوان با هزینهٔ کمتر، میزان آلودگی در سطح شهر را پوشش داد.

منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر در محدودهٔ فضایی شهر تهران انجام شد. شهر تهران، پایتخت و پُرجمعیت‌ترین شهر ایران (۹/۰۳۹ میلیون نفر) است. تهران به ۲۲ منطقه و ۱۲۲ ناحیهٔ شهری تقسیم شده است و شهرهای تجریش و ری را نیز فرا گرفته است. شهر تهران در عرض شمالی ۳۳ تا ۳۵ درجه و طول شرقی ۵۱/۱۷ تا ۵۱/۳۳ درجه قرار دارد و با مساحتی حدود ۷۳۰ کیلومترمربع، از کوهپایه‌های جنوبی رشته کوه البرز شروع شده (ارتفاع ۱۸۰۰ متری از سطح دریا) و با گرادیان شیب ارتفاعی، به دشت کویر در جنوب استان تهران (ارتفاع ۹۰۰ متری از سطح دریا) ختم می‌شود (شکل ۱). تهران دارای اقلیم نیمه خشک است و بادهای غالب آن غربی بوده و سامانه‌های بارشی آن نیز به‌واسطهٔ بادهای غربی به‌ویژه سیستم باران‌زای مدیترانه‌ای است. متوسط دمای سالانهٔ شهر تهران ۱۷/۱ درجه سلسیوس، متوسط بارندگی سالانه ۲۳۱ میلی‌متر و میانگین روزهای یخبندان در طول سال ۴۹ روز می‌باشد. سرعت متوسط باد ۸ کیلومتر بر ساعت و رطوبت نسبی حدود ۳۹ درصد است. مسیر اصلی و جهت باد غالب شهر تهران، شمال غرب به جنوب‌شرقی است.



شکل ۱– محدوده مورد مطالعه، شهر تهران (تصویر پس زمینه: سنجنده OLI ماهواره LANDSAT، ۲ ژوئن ۲۰۲۴)

Fig. 1. Study area, Tehran city (Background image: LANDSAT OLI, June 2, 2024)

مواد و روش‌ها

این پژوهش برای جانمایی حسگرهای کم‌هزینه جهت سنجش آلاینده‌های هوا در شهر تهران انجام شد که منابع اطلاعاتی موردنیاز و روش مورداستفاده به شرح زیر تشریح می‌گردد.

منابع اطلاعاتی

اطلاعات موردنیاز در این پژوهش شامل داده‌های مربوط به غلظت آلاینده‌های هوا و شناسایی منابع تولید آلاینده‌ها است. غلظت آلاینده‌های هوا در ایستگاه‌های پایش کیفیت هوای شهر تهران به‌صورت روزانه اندازه‌گیری می‌شوند. در این پژوهش، اطلاعات مربوط به غلظت گازها (CO، SO_2، NO_2 و O_3) و ذرات معلق (PM_{10}،$_{2.5}$) از ۲۴ ایستگاه پایش کیفیت هوا در شهر تهران در مقیاس زمانی یک ساعته در سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۲ شمسی تهیه شد. اگرچه تصاویر ماهواره سنتینل۵ نیز برای پایش کیفیت هوا مناسب است، اما محدودیت اصلی آن، در روزهای ابری است و در نیمهٔ سردِ سال که تعداد روزهای ابری در تهران افزایش می‌یابد و در بیش‌از ۶۰ درصد روزها، ابرناکی زیاد است، نمی‌توان به داده‌های این ماهواره اعتماد کرد، به همین دلیل در این پژوهش از اطلاعات ایستگاه‌های زمینی پایش آلاینده‌های هوای تهران استفاده گردید.

اطلاعات مربوط به دیگر مؤلفه‌ها شامل نزدیکی به بزرگراه‌ها، جایگاه‌های سوخت، مراکز صنعتی، پایانه‌ها و ایستگاه‌های حمل‌ونقل شهری و همچنین مؤلفه ترافیک شهری از روی تصاویر ماهواره Landsat، نقشه‌های کاداستر شهری و نقشه کاربری اراضی شهر تهران به دست آمد؛ به‌گونه‌ای که ابتدا مختصات جغرافیایی منابع فوق‌الذکر از طریق نقشه‌های شهری و مشاهدات میدانی به‌دست آمد، سپس در نرم‌افزار ArcGIS pro با ابزار Geocoding، نقاط مشخص شده بر روی تصویر لندست اضافه گردید و برچسب‌گذاری شد.

تهیه لایه‌های رقومی

پس از بررسی اسناد و منابع علمی و همچنین مصاحبه با متخصصین مهندسی آلودگی هوای شهری، یازده زیرمعیار در قالب دو معیار برای جانمایی حسگرهای کم‌هزینه برای پایش آلودگی هوای شهر تهران شناسایی شد.

معیار منابع آلودگی

معیار منابع آلودگی شامل زیرمعیارهای فاصله از جادهٔ شهری، فاصله از جایگاه‌های سوخت، فاصله از پایانه‌های حمل‌ونقلی، فاصله از نقاط ترافیکی و فاصله از مراکز صنعتی می‌باشد. برای هر یک از این زیرمعیارها، در نرم‌افزار ArcGIS pro لایهٔ اطلاعات رقومی تهیه گردید؛ به‌گونه‌ای که پس از تعیین این نقاط (منابع آلودگی) و برچسب‌گذاری آنها، با تابع فاصلهٔ اقلیدسی، برای هر یک از زیرمعیارها نقشهٔ پهنه‌بندی شدهٔ فاصله از منبع آلودگی ترسیم گردید و به عنوان یک لایهٔ رقومی در نظر گرفته شد. با توجه به اهمیتی که فاصله از منابع آلودگی هوا در جانمایی حسگرهای بَرخط دارند، لایهٔ رقومی آنها باید طبقه‌بندی مجدد شود و برای هر زیرمعیار از منابع آلودگی، یک نقشهٔ طبقه‌بندی شده تهیه گردید (جدول ۱).

پس از طبقه‌بندی مجدد، لایه‌ها (نقشه‌ها) با عملگر Small، فازی شدند؛ به این معنا که هر چه فاصله از منبع آلودگی بیشتر شود، ارزش عددی (درجه عضویت فازی) در پهنهٔ شهر تهران به سمت صفر میل می‌کند و ارزش آن برای جانمایی حسگر کاهش می‌یابد؛ اما هرچه به منبع آلودگی نزدیک‌تر باشد، ارزش آن برای نصب حسگر افزایش می‌یابد و درجه عضویت فازی آن به یک میل می‌کند. منظور از درجه عضویت فازی[1]، ارزش هر نقطه از پهنهٔ شهر تهران برای نصب حسگر را نشان می‌دهد، که اگر به یک میل کند، ارزش بالا و اگر به صفر میل کند، ارزش پایینی دارد.

1 - Fuzzy Membership

جدول ۱- طبقه‌بندی زیرمعیارهای منابع آلودگی هوا (برحسب متر)

Table 1- Classification of air pollution sources sub-criteria (meters)

زیرمعیار	مطلوبیت خیلی زیاد Very High Utility	مطلوبیت زیاد High Utility	مطلوبیت متوسط Moderate Utilit	مطلوبیت کم Low Moderat
فاصله از جاده شهری Distance to Highway	100	200	500	>500
فاصله از جایگاه سوخت Distance to oil station	150	500	1000	>1000
فاصله از پایانه‌ها Distance to terminal and stations	100	200	500	>1000
فاصله از نقاط ترافیکی Distance to traffic points	150	500	1000	>1000
فاصله از مراکز صنعتی Distance to industrial points	500	1000	2000	>2000

معیار غلظت آلاینده‌های هوا

معیار آلاینده‌های هوا شامل ذرات معلق ($PM_{2.5-10}$)، گازهای مونوکسیدکربن (CO)، ازن (O_3)، اکسیدنیتروژن (NOx) و دی‌اکسیدگوگرد (SO_2) می‌باشد که غلظت آنها از ایستگاه‌های پایش مرجع به دست آمد. مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های مرجع در نرم‌افزار ArcGIS pro با ابزار Geocoding، وارد شده و محل ایستگاه به صورت لایه نقطه‌ای بر روی پهنهٔ شهر تهران مشخص شد. غلظت آلاینده‌ها به هر نقطه که نشانگر محل ایستگاه‌های مرجع هستند، اضافه شد. سپس با تابع درون‌یابی وزنی معکوس فاصله‌ای[1]، نقشهٔ پهنه‌بندی غلظت برای هر آلاینده در پهنهٔ شهر تهران ترسیم گردید. در ادامه، لایه‌های رقومی تهیه شده طبقه‌بندی مجدد شد و با عملگر Large، درجه عضویت فازی برای هر نقشه تعیین شد؛ به‌گونه‌ای که هرچه غلظت آلاینده بیشتر باشد، درجه عضویت فازی افزایش می‌یابد و ارزش اراضی برای نصب حسگر بیشتر می‌شود و بالعکس، هرچه غلظت آلاینده کمتر باشد، درجه عضویت فازی کاهش می‌یابد و ارزش اراضی نیز برای نصب حسگر کمتر می‌شود (جدول ۲).

جدول ۲- طبقه‌بندی زیرمعیارهای غلظت آلاینده‌ها (برحسب متر)

Table 2- Classification of pollutant concentration sub-criteria (meters)

زیرمعیار Sub Criteria	واحد Unit	مطلوبیت خیلی زیاد Very high utility	مطلوبیت زیاد high utility	مطلوبیت متوسط Moderate utility	مطلوبیت کم Low Moderate
$PM_{2.5}$	ug/m^3	38 - 44	34 - 38	30 - 34	<30
PM_{10}	ug/m^3	96 - 104	89 - 96	73 - 89	<73
CO	ppm	>3.2	2.6 – 3.2	1.9 – 2.6	<1.9
O_3	ppb	23 - 25	21 - 23	20 - 21	<21
NO_x	ppb	146 - 200	120 - 146	110 - 120	<120
SO_2	ppb	14.4 – 17.7	12 – 14.3	10 - 12	<10

1 - IDW

وزن‌دهی لایه‌ها

هر پارامتر (زیرمعیار) اثر متفاوتی نسبت به دیگر زیرمعیارها در جانمایی حسگرها دارد؛ برای اینکه میزان اثرگذاری و یا وزن آنها به دست آید، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تکنیک تحلیل شبکه (ANP[1]) استفاده شد. با اجرای این تکنیک در نرم‌افزار Super decision و مقایسه‌های دوبه‌دو بین زیرمعیارها و تشکیل ماتریس مقایسات زوجی، وزن هر زیرمعیار به دست آمد (Gurram, Bulusu & Kinthada, 2015). به‌گونه‌ای که پرسشنامه تهیه شد و در اختیار خبرگان قرار گرفت. حجم پرسشنامه‌ها با فرمول کوکران به‌دست آمد. برای پایایی پرسشنامه‌ها از ضریب آلفای کرونباخ استفاده گردید که مقدار ضریب a، ۰/۸۲ به‌دست آمد. سپس نتایج پرسشنامه‌ها وارد نرم‌افزار شده و با تکنیک ANP وزن هر زیرمعیار به‌دست آمد.

سپس وزن به‌دست‌آمده برای هر زیرمعیار، در نرم‌افزار ArcGIS pro با دستور Raster Calculator، در لایهٔ مربوط به آن زیرمعیار ضرب شد و نقشهٔ فازی‌شدهٔ وزن‌دار برای هر زیرمعیار تهیه گردید. نقشهٔ نهایی هر زیرمعیار، بیان‌گر نقشهٔ وزن‌دار فازی شدهٔ آن است که در ادامه قابلیت روی‌هم‌گذاری[2] با سایر زیرمعیارها را برای انتخاب مکان‌های مناسب برای نصب حسگرها فراهم می‌گردد.

ترکیب لایه‌ها

برای تهیه نقشهٔ نهایی از تناسب اراضی در پهنهٔ شهر تهران برای نصب حسگرها، زیرمعیارها (لایه‌های وزن‌دار شدهٔ فازی) با توابع مختلف فازی Product، SUM، OR، AND، گامای ۰/۹، ۰/۷ و ۰/۵ به تفکیک رویهم‌گذاری شدند؛ به این معنا که هر بار با یکی از این توابع، عملیات رویهم‌گذاری انجام شد، در واقع همهٔ این توابع تست شدند تا بتوان بهترین عملگر را برای آنها انتخاب کرد.

عملگر OR، حداکثر مقدار عضویت پیکسل را به‌عنوان مقدار عضویت در نقشهٔ نهایی وارد می‌شود.

عملگر اشتراک فازی AND، حداقل درجهٔ عضویت پیکسل‌ها را برای نقشه نهایی در نظر می‌گیرد.

عملگر ضرب فازی Product درجه عضویت‌های یک موقعیت در نقشه‌های مختلف را در هم ضرب می‌کند.

عملگر جمع SUM، مقدار عضویت نهایی پیکسل‌ها در نقشهٔ خروجی بزرگ شده، درصورت زیاد بودن ورودی‌ها، به یک میل می‌کند. به‌دلیل بزرگ بودن اوزان موقعیت‌های نهایی اثر این عملگر افزایشی است. رابطهٔ عملگر فازی حالت کلی عملگرهای ضرب و جمع است و می‌توان با انتخاب صحیح مقدار گاما (۰/۹، ۰/۷ و ۰/۵) پارامترهای کاهشی و افزایشی را همزمان تلفیق نموده، به مقادیری در خروجی‌ها دست یافت که حاصل سازگاری قابل انعطاف میان گرایش‌های افزایشی و کاهشی دو عملگر ضرب و جمع فازی می‌باشند (Li et al., 2023).

به‌منظور انتخاب بهترین عملگر فازی برای روی‌هم‌گذاری لایه‌ها، از رگرسیون حداقل مربعات (OLS) استفاده شد (Gu, Yan, Elahi & Cao, 2020). زیرمعیارها به‌عنوان متغیرهای مستقل و لایهٔ حاصل از هر عملگر روی‌هم‌گذاری به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. ضریب همبستگی آنها با رگرسیون OLS محاسبه شد و عملگری که بیشترین همبستگی را با زیرمعیارها دارد، به‌عنوان عملگر نهایی برای ترکیب لایه‌ها استفاده شد.

شاخص موران

همبستگی فضایی و خودهمبستگی نقش مهمی در مدل‌سازی فضایی دارند. ازآنجایی‌که طیف گسترده‌ای از روش‌های آزمایش و اندازه‌گیری خودهمبستگی فضایی توسعه داده شده است، بسیاری از جغرافی‌دانان مشتاق به استفاده از Moran’s I هستند که یکی از خودهمبستگی‌های فضایی معروف است (Gu, Zhou, Sun, Dong & Zhao, 2021). مقدار شاخص جهانی Moran's I در

1 - Analytic Network Process

2- Overlay

محدوده ۱+ تا ۱- است. این شاخص که نشان دهنده الگوی فضایی است به این صورت تعریف می شود که اگر آمارۀ شاخص بزرگ‌تر از صفر باشد الگو دارای خوشه است، اگر صفر به دست آمد داده‌ها پراکنده و اگر کمتر از صفر باشد توزیع تصادفی است (Lu, Yang, Ge & Harris, 2018). در پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی الگوی توزیع مکانی نصب حسگرهای کم‌هزینه آلودگی هوا در شهر تهران که از ترکیب لایه‌ها به‌دست آمد، از شاخص خودهمبستگی موران در نرم‌افزار ArcGIS pro استفاده شد که معادلۀ آن به صورت رابطه‌های (۱، ۲ و ۳) است:

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} W_{i,j} z_i z_j}{\sum_{i=1}^{n} z_i^2} \quad (۱)$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} W_{i,j} \quad (۲)$$

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{V(I)}} \quad (۳)$$

که در آن $W_{i,j}$ وزن فضایی بین ویژگی i و j را نشان می‌دهد، n تعداد کل ویژگی‌ها است، $Z_i=(X_i-X)$ و آماره Z استاندارد شاخص موران است.

سپس برای بررسی خوشه‌بندی داده‌ها، از مدل تحلیل لکه‌های داغ (Hotspot) استفاده گردید و با آن، نقشۀ پیش‌بینی از ترکیب زیرمعیارها تهیه گردید که "نقاط داغ" برای نصب حسگر مناسب است، ولی "نقاط سرد" برای نصب حسگر مناسب نیست. پس از به‌دست‌آوردن الگوی خوشه‌بندی، لکه‌های دارای بیشترین امتیاز به نام لکه‌های داغ مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفتند. براین‌اساس، آمار Gi* برای ویژگی‌ها توسط ابزار تحلیل نقطه داغ در نرم‌افزار GIS تعیین شد. آمار Gi* با مقایسه مجموع محلی مقدار ویژگی موردنظر و همسایگان آن با مجموع همه مقادیر ویژگی محاسبه می‌شود (Yang, Wang, Zhang, Zhan & Li, 2017). Zscore از آمار Gi* برای نمرات Z مثبت به دست آمد. Z-score بزرگ‌تر نشان دهندۀ شدت بیشتر مقادیر بالای خوشه‌بندی است. برای امتیازهای Z منفی، امتیاز Z کوچک‌تر نشان‌دهنده شدت بیشتر و خوشه‌بندی مقادیر کم است (نقطه سرد).

تحلیل حساسیت روابط فضایی

در آخرین بخش از پژوهش حاضر، ارتباط مکانی - فضایی بین متغیرهای مستقل (۱۱ زیرمعیار) با متغیر وابسته (نقشۀ نهایی حاصل از ترکیب لایه‌ها) با مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی محاسبه گردید.

روش تحلیل رگرسیون خطی مبتنی بر یک «فرض جهانی» است، با این فرض که متغیرها در منطقه موردمطالعه ثابت هستند و با تغییر موقعیت مکانی تغییر نمی‌کنند. بااین‌حال، ناهمگونی متغیرها در همه جای فضای جغرافیایی واقعی وجود دارد. GWR یک روش رگرسیونی برای تخمین ناهمگونی فضایی محلی و بررسی تغییرات مکانی و عوامل محرک مربوط به متغیرها در منطقه موردمطالعه در مقیاس معین است. این روش به طور گسترده در اقتصاد، جامعه‌شناسی، تحلیل شهری و منطقه‌ای، بوم‌شناسی و محیط‌زیست استفاده شده است (Lu et al., 2018). از آنجایی که ناهمگنی فضایی و تفاوت‌های محلی فضایی اطلاعات تحقیق در مدل GWR مورد بحث قرار می‌گیرد، نقاط تحلیل رگرسیون از منطقه مورد مطالعه استخراج می‌شوند. مدل رگرسیون با توجه به هر موقعیت جغرافیایی برآورد شده است. ضریب رگرسیون فضایی مربوط به موقعیت مکانی به دست می‌آید که از نظر کمّی ناهمگونی فضایی رابطه متغیر ناشی از تغییر موقعیت مکانی را منعکس می‌کند. مدل GWR به طور گسترده‌ای برای بررسی تغییرات فضایی سطوح پیوسته با مقدار پارامتر در مقیاس منطقه‌ای استفاده می‌شود (Liu, Sun & Chen, 2017). مدل GWR را می‌توان به صورت رابطه (۴) بیان کرد:

$$y_i = \beta_0(\mu_i, \vartheta_i) + \sum_{i=1}^{n} \beta_{1k}(\mu_i, \vartheta_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (۴)$$

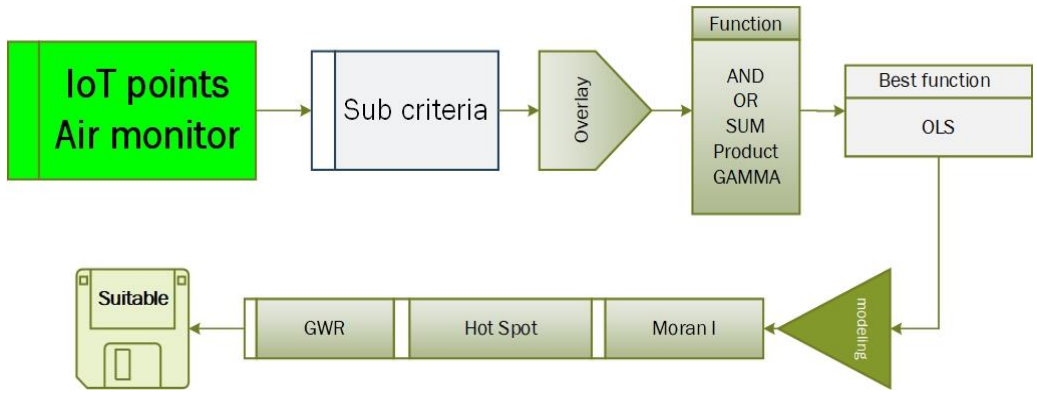
که در آن yi متغیر وابسته (نقشه نهایی از ترکیب لایه‌ها) است. یازده متغیر مستقل X_{ik} (۱، ... ۱۱) و β_{1k}، پارامترهای رگرسیون محلی هستند که باید تخمین زده شوند. εi نیز خطای تصادفی است. بنابراین، هر پیکسل در این پژوهش دارای مجموعه‌ای از پارامترهای خاص برای منعکس کردن روابط بین مطلوبیت اراضی تهران برای نصب حسگر و یازده متغیر مستقل است.

قانون اول جغرافیای توبلر تأیید می‌کند که هر رابطه‌ای دارای روابط علت‌ومعلولی است، اما عوارض و پدیده‌های مشابه، ارتباط نزدیک‌تری دارند. به طور مشابه، همبستگی بین دو نقطه بیشتر از دو نقطهٔ غیرمجاور است. هنگام استفاده از GWR، تأثیر یک متغیر معین با افزایش فاصله بین دو نقطه کاهش می‌یابد. ضریب تخمین را می‌توان در قالب ماتریس رابطه (۵) محاسبه کرد:

$$\beta_f(\mu_i, \vartheta_i) = (X^T W(\mu_i, \vartheta_i) X)^{-1} X^T W(\mu_i, \vartheta_i) Y \qquad (۵)$$

پارامترها با فرم ماتریس زیر حل می‌شوند که در آن $\beta_f(\mu_i, \vartheta_i)$ مقدار تخمینی پارامتر وابسته به موقعیت است و $W(\mu_i, \vartheta_i)$ نشان دهندهٔ یک ماتریس وزن فضایی n×n است که عناصر مورب صفر هستند. T عملیات جابه‌جایی ماتریس است. عناصر مورب وزن جغرافیایی داده‌های مشاهده شده را در نقطه j نشان می‌دهند. در این پژوهش، یک ماتریس وزن برای نشان دادن اهمیت نسبی بین نقاط شهر تهران انتخاب شد. مقدار وزن یک تابع فاصله-واپاشی است که تابع توزیع گوسی و نرمال است.

بنابراین، مدل با متغیرهای مستقل (زیرمعیارها)، در نرم‌افزار ArcGIS با دستور Geographically Weighted regression اجرا شد و ضریب R^2 محلی و معیار AIC برای ارزیابی مدل برازش شده مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت مطلوبیت اراضی برای نصب حسگر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی با آزمون تی استیودنت مقایسه گردید.



شکل ۲- دیاگرام روش پژوهش (جانمایی حسگرهای کم‌هزینه برای پایش آلودگی هوا در تهران)

Fig.2. Diagram of the research method (placement of low-cost sensors for air pollution monitoring in Tehran)

نتایج و بحث

زیرمعیارهای پژوهش با تکنیک تحلیل شبکه، دوبه‌دو، مقایسه زوجی شدند و در نهایت وزن فازی هر یک از آنها به دست آمد (جدول ۳). نتایج نشان داد غلظت ذرات معلق گزارش شده بیشترین اهمیت را در انتخاب مکان مناسب برای نصب حسگرها دارند، چون‌که این ذرات بیان‌گر سطح آلودگی و نقاط بسیار آلوده در شهر هستند و قاعدتاً مناطق آلوده مهم‌ترین مکان برای نصب حسگرها هستند. پس از آن، ایستگاه‌های حمل‌ونقل شهری که شامل پایانه‌ها، ایستگاه‌های اتوبوس و تاکسیرانی در سطح شهر تهران می‌باشد، بیشترین اهمیت را در انتخاب اراضی برای نصب حسگرها دارند. نزدیکی به جایگاه‌های سوخت و بزرگراه‌ها نیز در رتبه‌های سوم و چهارم قرار دارند.

جدول ۳- وزن و درجه عضویت فازی زیرمعیارها در جانمایی حسگرهای کم‌هزینه آلودگی هوا در شهر تهران
Table 3- The weight and fuzzy membership of the sub-criteria in the placement of low-cost air pollution sensors in Tehran.

ردیف	زیرمعیار	Sub criteria	Fuzzy membership
1	نزدیکی به بزرگراه	Near to Highway	0.107
2	نزدیکی به ایستگاه حمل‌ونقل	Near to stations	0.139
3	نزدیکی به نقاط ترافیکی	Near to traffic point s	0.055
4	نزدیکی به جایگاه سوخت	Near to Oil station	0.113
5	نزدیکی به مراکز صنعتی	Near to industrial points	0.089
6	غلظت ذرات معلق PM_{10}	PM_{10}	0.170
7	غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$	0.151
8	غلظت گاز منوکسید کربن	CO	0.071
9	غلظت گاز اکسید نیتروژن	NOx	0.036
10	غلظت گاز ازن	O_3	0.035
11	غلظت گاز دی‌اکسید گوگرد	SO_2	0.034

برای هر یک از زیرمعیارها، نقشه‌های رقومی تهیه گردید و همان‌طور که در بخش روش پژوهش بیان شد، وزن به‌دست‌آمده از تحلیل شبکه، در لایه ضرب شد و نقشه وزن‌دار شدهٔ فازی برای زیرمعیارها تهیه گردید و در اشکال زیر ارائه شده است.

باتوجه به نقشهٔ نهایی زیرمعیار ذرات معلق PM_{10}، اراضی واقع در جنوب و جنوب‌غربی شهر تهران به‌دلیل غلظت بالای ذرات معلق، برای نصب حسگرهای کم‌هزینه مناسب‌تر از سایر مناطق هستند. نقشه‌های فازی و وزن‌دار شدهٔ FANP برای زیرمعیار ذرات معلق $PM_{2.5}$ نیز تهیه شد. باتوجه‌به اینکه وزن این زیرمعیار ۰/۱۵۱ به‌دست آمد، بیشترین درجه عضویت فازی این زیرمعیار نیز ۰/۱۵۱ است، اما برای PM_{10} ۰/۱۷۰ بود. بنابراین عضویت زیرمعیار PM_{10} بیشتر از $PM_{2.5}$ است و تاثیر بیشتری در انتخاب مکان‌های مناسب برای نصب حسگرهای کم‌هزینه دارند. از لحاظ زیرمعیار $PM_{2.5}$، اراضی واقع در نواحی جنوبی و منطقه ۳ در شمال تهران، برای نصب حسگرها مناسب هستند و بیشترین عضویت فازی را نسبت به سایر مناطق دارند (شکل ۳).

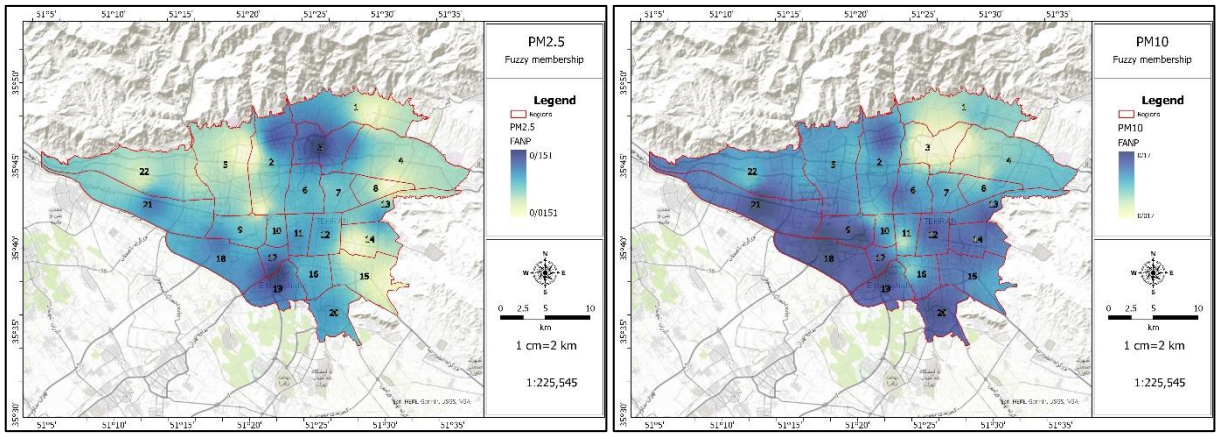
در نقاطی که غلظت گازهای آلاینده زیاد است، اهمیت و نقش فازی آن به یک نزدیک است و مناطقی که غلظت گاز کمتر از سایر مناطق است، اهمیت فازی آن به صفر میل کرده و نقش زیادی در تناسب اراضی برای نصب حسگر ندارند؛ بنابراین نقاط و مناطقی که غلظت آلاینده‌ها زیاد است، مکان مناسبی برای نصب حسگر هستند. این تکنیک برای همهٔ گازها اجرا شد و نقشهٔ هر یک از آنها تهیه شده است. غلظت منوکسید کربن در جنوب‌غربی شهر تهران بیشتر از سایر نواحی است. بیشترین درجه عضویت فازی آن ۰/۰۷۱ است و به این اراضی از لحاظ گاز منوکسید کربن در روی‌هم‌گذاری، ۰/۰۷۱ اختصاص داده شد، اما برای اراضی که غلظت این گاز کمتر است، وزن ۰/۰۰۷۱ اختصاص داده شد که برای نصب حسگر مناسب نیستند، چون‌که درجه عضویت آنها بسیار کم است. غلظت گاز ازن در مناطق ۱۵ و ۳ بیش از سایر مناطق است و درجه عضویت فازی و وزن این مناطق برای نصب حسگر بیشتر از سایر مناطق است. حداکثر وزن این زیرمعیار با عضویت ۰/۰۳۵ در همین مناطق آلوده است. تاثیر این گاز در رویهم‌گذاری لایه‌ها برای انتخاب مکان‌های مناسب جهت نصب حسگرها حداکثر ۰/۰۳۵ و حداقل ۰/۰۰۳۵ است (شکل ۴).

غلظت گاز ناکس (اکسید نیتروژن) در مناطق ۱۰ و ۴ بیشتر از سایر مناطق است و با توجه به درجه عضویت ۰/۰۳۶ این گاز، بیشترین عضویت و اهمیت مربوط به همین مناطق است؛ اما در مناطق دیگر که غلظت این گاز پایین است، عضویت ۰/۰۰۳۶

اختصاص داده شده و در رویهم‌گذاری تاثیر زیادی نداشته و امتیاز کمی برای نصب حسگر به این مناطق داده می‌شود. گاز دی-اکسیدگوگرد در بین همهٔ زیرمعیارها، کمترین تاثیر را در جانمایی حسگرها دارد و درجه عضویت آن حداکثر ۰/۰۳۴ است و به نقاطی اختصاص دارد که بیشترین غلظت گاز دی‌اکسیدگوگرد را دارند که به مناطق ۳ و ۱۶ اختصاص داده شده است (شکل ۵).

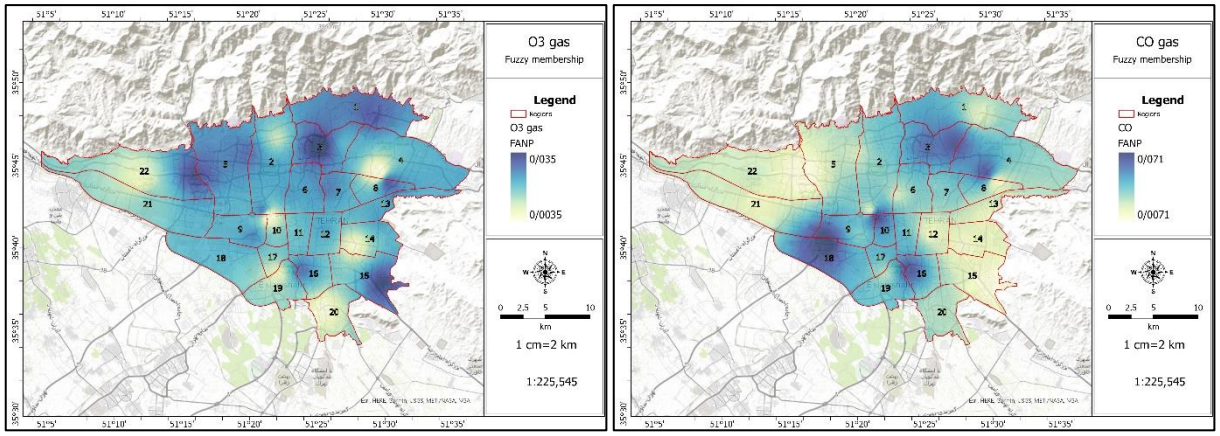
نقاط، ایستگاه‌های حمل‌ونقل هستند که پایانه‌های مسافربری، اتوبوس و ایستگاه تاکسی است. این نقاط، از منابع اصلی آلودگی هوای تهران به شمار می‌روند و غلظت آلاینده‌های هوا در این نقاط بیشتر از سایر نواحی است؛ بنابراین در فاصلهٔ نهایتاً ۱۰۰ متری از این نقاط، مکان مناسبی برای نصب حسگرها است؛ اما با فاصله از این نقاط، از اهمیت اراضی برای نصب حسگر کاسته می‌شود. درجه عضویت این زیرمعیار ۰/۱۳۹ است و به همین مقدار در روی‌هم‌گذاری لایه‌ها برای انتخاب مکان مناسب تاثیرگذار است، اما مناطقی که از لحاظ این زیرمعیار دارای ۰/۰۱۳۹ هستند، مکان مناسبی نخواهند بود. بزرگراه‌های شهری نیز یکی از منابع اولیه و اصلی در تولید آلاینده‌های هوا به‌ویژه ذرات معلق و گازهای منوکسید کربن و ناکس هستند. تا فاصله ۱۰۰ متری از این بزرگراه‌ها، اراضی مستعد نصب حسگر هستند، ولی با افزایش فاصله، از ارزش زمین برای نصب حسگر کاسته می‌شود. بیشترین درجه عضویت این زیرمعیار ۰/۱۰۷ است که به اراضی نزدیک به بزرگراه‌ها اختصاص داده شده است (شکل ۶).

جایگاه سوخت یکی دیگر از منابع اصلی تولید آلاینده‌های هوای شهری است. تا فاصله ۱۵۰ متری و حتی ۵۰۰ متری از این جایگاه‌های سوخت، مکان مناسبی برای نصب حسگرها است، اما با افزایش فاصله، مکان اهمیت خود را برای نصب حسگر آلودگی هوا از دست می‌دهد. بنابراین اراضی نزدیک به این جایگاه‌ها با عضویت فازی ۰/۱۱۳، اراضی مناسب برای نصب حسگر هستند و به همین مقدار در نتیجه نهایی (مکان منتخب) تاثیرگذار است. اگرچه مراکز صنعتی وزن و اهمیت کمتری نسبت به جایگاه‌های سوخت، ایستگاه‌های حمل و نقل و بزرگراه‌ها در آلودگی هوای شهر تهران دارند، اما سهم آنها در تولید آلاینده‌های هوا قابل انکار نیست و در تولید ازن و دی‌اکسیدگوگرد و به‌ویژه ذرات معلق بسیار زیاد است. بنابراین بایستی در اراضی نزدیک به صنایع، غلظت آلاینده‌ها پایش شود. حداکثر درجه عضویت این زیرمعیار ۰/۰۸۹ است که به اراضی صنعتی و نزدیک به این نقاط صنعتی اختصاص دارد؛ ولی با فاصله از آن، ارزش اراضی نیز کاهش می‌یابد (شکل ۷).



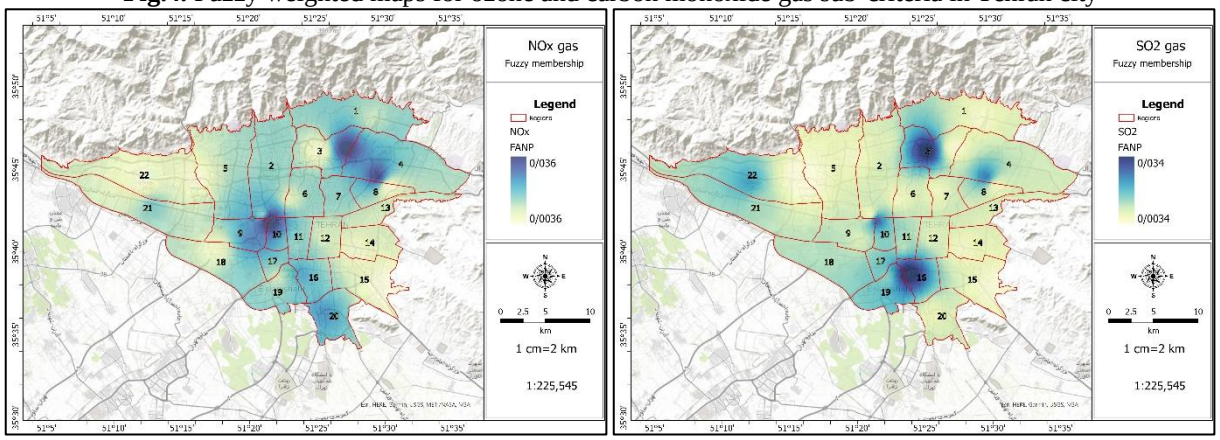
شکل ۳- نقشه های وزن دار شدهٔ فازی برای زیرمعیارهای $PM_{10-2.5}$ در شهر تهران

Fig.3. Fuzzy weighted maps for $PM_{10-2.5}$ sub-criteria in Tehran city



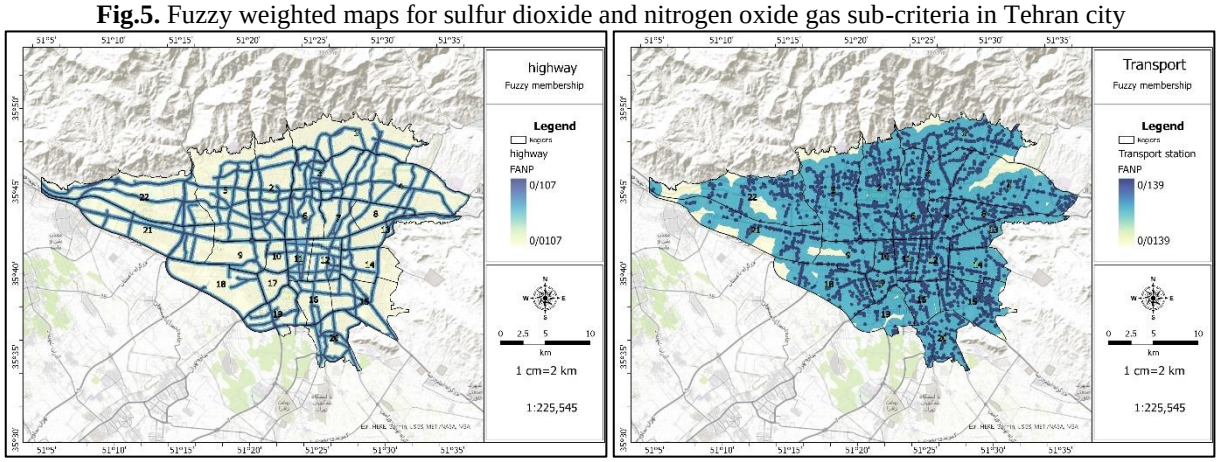
شکل ۴- نقشه های وزن دار شدهٔ فازی برای زیرمعیارهای گاز ازن و منوکسید کربن در شهر تهران

Fig.4. Fuzzy weighted maps for ozone and carbon monoxide gas sub-criteria in Tehran city



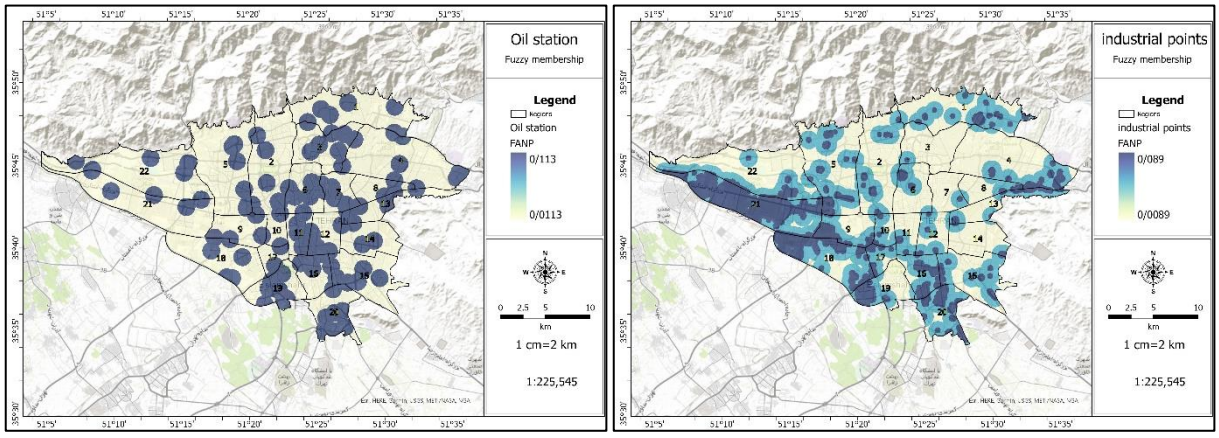
شکل ۵- نقشه های وزن دار شدهٔ فازی برای زیرمعیارهای گاز دی اکسیدگوگرد و اکسید نیتروژن در شهر تهران

Fig.5. Fuzzy weighted maps for sulfur dioxide and nitrogen oxide gas sub-criteria in Tehran city



شکل ۶- نقشه‌های وزن‌دار فازی برای زیرمعیارهای نزدیکی به بزرگراه و ایستگاه‌های حمل و نقل در شهر تهران

Fig.6. Fuzzy weighted maps for the sub-criteria of proximity to the highway and transportation stations in Tehran



شکل ۷- نقشه های وزن دار شدهٔ فازی برای زیرمعیارهای نزدیکی به مکان صنعتی و جایگاه سوخت در شهر تهران

Fig.7. Fuzzy weighted maps for sub-criteria of proximity to industrial place and fuel station in Tehran city

همبستگی متغیرها

برای هر یک از عملگرهای فازی رویهم‌گذاری که شامل AND، OR، SUM، Product گامای ۰/۹، ۰/۷ و ۰/۵ می‌باشند، یک نقشهٔ روی‌هم‌گذاری شده، تهیه گردید. سپس با رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLS)، ارتباط بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته که نقشه‌های مربوط به هر عملگر است، بررسی شد (جداول ۴ و ۵). نتایج نشان می‌دهد که تابع SUM بر اساس معیارهای ارزیابی ضرایب رگرسیونی و ضریب تعیین، بهترین عملکرد را نسبت به سایر توابع فازی در همبستگی بین نقشه نهایی با زیرمعیارهای پژوهش دارد. نقشه خروجی عملگر فازی SUM حاصل بزرگ‌شدن پیکسل‌هایی با درجه عضویت بالا است. اراضی که عضویت بالایی در زیرمعیارها داشتند، در این عملگر به سمت یک میل کرده‌اند و مکان‌های مناسب برای نصب حسگر هستند و بیشترین درجه عضویت فازی را به خود اختصاص داده‌اند که در شکل ۸ نقشه نهایی از توزیع فضایی تناسب اراضی از این عملگر نشان داده شده است. ضریب همبستگی بین نقشه نهایی عملگر SUM و زیرمعیارهای پژوهش بیان‌گر ارتباط معنی‌دار بین تمام زیرمعیارها با نقشه نهایی که نقشهٔ حاصل‌از عملگر SUM می‌باشد، است. بنابراین بیشترین همبستگی معنی‌دار در این عملگر نشان داده شده است. همهٔ زیرمعیارها می‌توانند وارد مدل‌سازی در مراحل بعدی شوند. پس نقشه نهایی SUM می‌تواند انتخاب نهایی برای نقشه رویهم‌گذاری شده برای ارزیابی تناسب اراضی شهر تهران برای جانمایی حسگرهای پایش آلودگی هوا باشد. بنابراین در این مرحله، نقشهٔ رویهم-گذاری دیگر توابع فازی حذف شده و از این مرحله به بعد، کنار گذاشته می‌شوند و فقط نقشهٔ روی‌هم‌گذاری شده با تابع SUM وارد مدل‌سازی مراحل بعدی شد.

جدول ۴- همبستگی عملگرهای فازی با زیرمعیارهای پژوهش

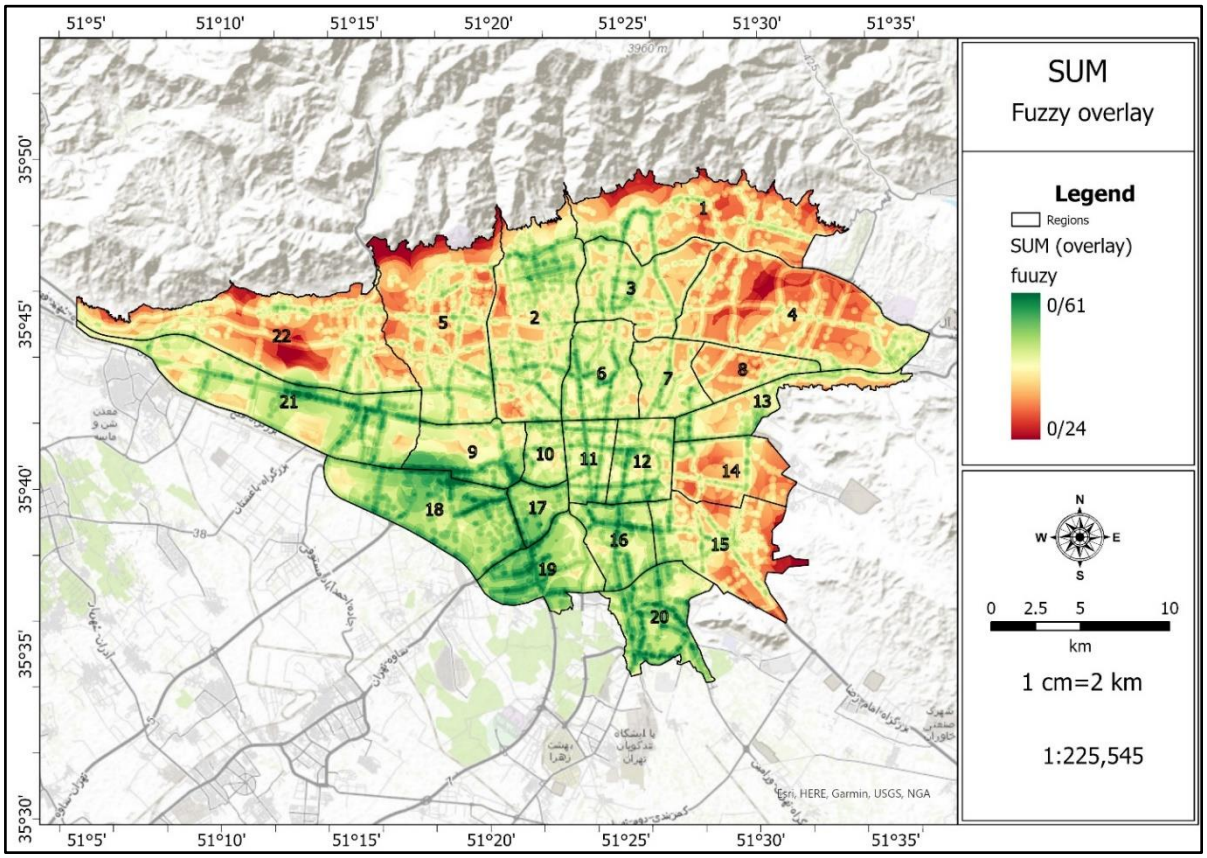
Table 4- Correlation of fuzzy operators with research sub-criteria

GAMMA 0.9	GAMMA 0.7	GAMMA 0.5	Product	OR	AND	SUM	Parameters
0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.058	0.000*	0.000*۰	SO_2
0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.779	0.000*	0.000*	O_3
0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	NO_x
0.000*	0.000*	0.001*	0.698	0.067	0.315	0.000*	CO
0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	PM_{10}
0.091	0.121	0.236	0.209	0.000*	0.000*	0.000*	$PM_{2.5}$
0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.002*	0.112	0.000*	Industrial points مراکز صنعتی
0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.007*	۰0.933	0.000*	Highway بزرگراه
0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.487	0.390	0.000*	Oil station جایگاه سوخت
0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.255	0.000*	Station پایانه
0.000*	0.000*	0.000*	۰0.019*	0.009*	۰0.017*	0.000*	Traffic points نقاط ترافیکی

جدول ۵- ارزیابی عملگرهای فازی با ضرایب رگرسیونی

Table 5- Evaluation of fuzzy operators with regression coefficients

آماره Jarque-Bera	R-Squared	AICc	تابع Function
1379	0.997	-5744	SUM
774	0.609	-6298	AND
15	0.730	-3962	OR
711	0.361	-42941	Product
24301	0.727	-22734	GAMMA 0.5
2590	0.872	-14886	GAMMA 0.7
87	0.971	-7785	GAMMA 0.9



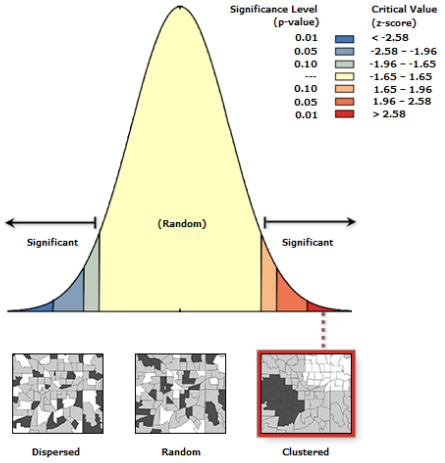
شکل ۸- نقشه ترکیب زیرمعیارها با عملگر فازی SUM در شهر تهران

Fig.8. The map of the combination of sub-criteria with the SUM fuzzy operator in Tehran

الگوی فضایی تناسب اراضی

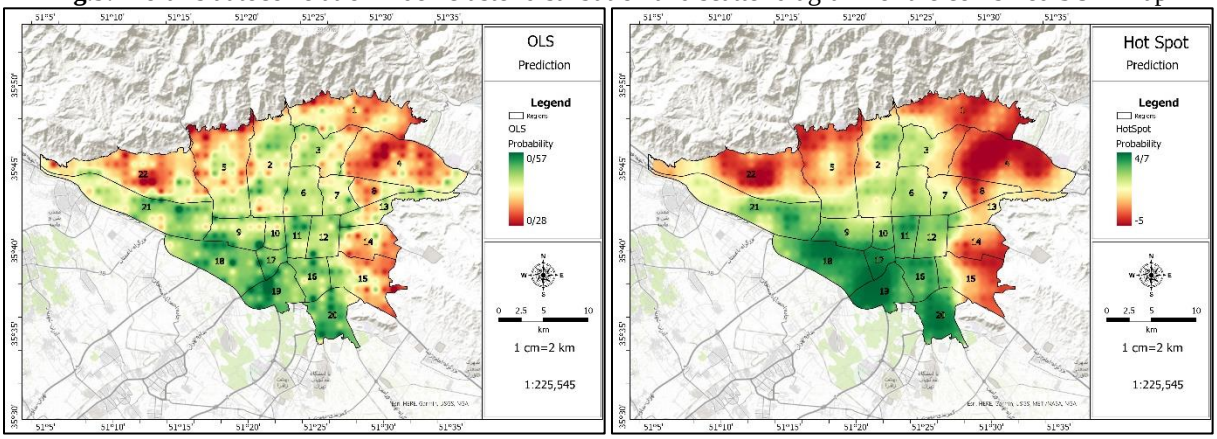
نتیجهٔ بررسی الگوی پراکنش فضایی در تناسب اراضی برای جانمایی حسگرهای کم‌هزینه برای پایش آلودگی هوای شهر تهران که از آمار فضایی (مدل موران و هات اسپات) به دست آمد، به این شرح می‌باشد که شاخص موران ۰/۵۳۲ به دست آمده است و نشان می‌دهد که داده‌ها دارای خودهمبستگی فضایی بوده و الگوی خوشه‌بندی دارند. مقدار Z و پایین‌بودن p-value (۰/۰۰۰) نشان دهندهٔ تأیید الگوی خوشه‌بندی تناسب اراضی برای نصب حسگرها است (شکل ۹).

نتایج حاصل از خودهمبستگی موران و هات اسپات که بیانگر خوشه‌ای بودن نقاط مناسب و نامناسب برای نصب حسگرها است، در مدل رگرسیونی OLS، درجه عضویت فازی نقشهٔ نهایی را بر اساس مدل موران به تصویر کشیده است که نشان می‌دهد بیشترین درجه عضویت فازی (نواحی جنوبی و جنوب‌غربی تهران) ۰/۵۷ است که با نتایج نقشهٔ نهایی SUM که ۰/۶۰ به‌دست آمد، تفاوت چندانی ندارد و بیانگر خوشه‌بندی قابل اعتماد مدل موران و هات‌اسپات برای نقاط مناسب و نامناسب جهت نصب حسگرها است. به‌طورکلی، مدل هات‌اسپات با اعتماد ۹۹ درصد نشان می‌دهد که اراضی جنوبی و جنوب‌غربی با توجه به زیرمعیارهای پژوهش، برای نصب حسگرها مناسب‌اند (شکل ۱۰). نتایج محاسبات بر نتایج مدل‌های آمار فضایی که خوشه‌بندی فضایی را مشخص کرده‌اند، صحه می‌گذارد.



شکل ۹- نمودار توزیع و پراکندگی خوشه‌ای شاخص خودهمبستگی موران برای نقشه ترکیبی SUM

Fig.9. Moran's autocorrelation index cluster distribution and scatter diagram for the combined SUM map



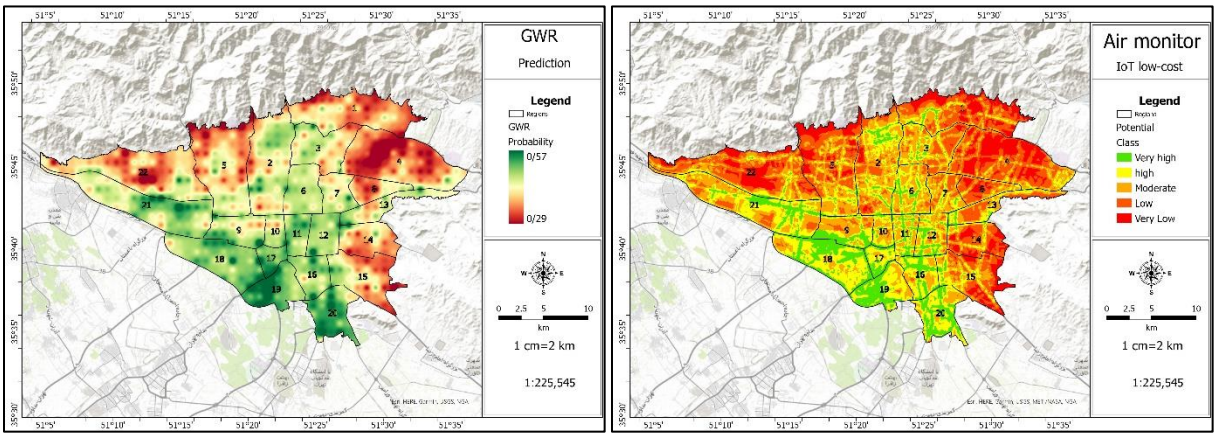
شکل ۱۰- نقشه لکه های سرد و داغ از مطلوبیت اراضی برای نصب حسگر با هات اسپات و مدل OLS

Fig.10. Map of cold and hot spots of land suitability for sensor installation with hotspot and OLS model

الگوی رابطهٔ فضایی

به‌منظور تحلیل حساسیت فضایی در ارتباط مستقیم و دقیق بین زیرمعیارهای پژوهش و نقشهٔ نهایی از مطلوبیت اراضی، از رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) استفاده شد. ضرایب ارزیابی مدل با متغیرهای مستقل و یک متغیر وابسته، بیانگر اعتبار و صحت مدل برای پیش‌بینی مطلوبیت اراضی برای نصب حسگرهای کم‌هزینه است. مطلوبیت اراضی با روش رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی توسط متغیرهای مستقل پیش‌بینی شد و نقشهٔ پراکنش فضایی مطلوبیت اراضی در شهر تهران به‌صورت مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده با مدل ترسیم گردید که نشان می‌دهد مطلوبیت اراضی در مدل پیش‌بینی شده با رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی توسط متغیرهای مستقل درست پیش‌بینی شده است (شکل ۱۱). معیار AIC و ضریب تعیین (R^2) برای مدل به‌ترتیب ۴۴۸۴ و ۰/۹۸ به‌دست آمد که بیان‌گر قابل اعتماد بودن نتایج مدل است. بنابراین مدل رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی توانسته است با متغیرهای مستقل، مطلوبیت اراضی برای نصب حسگرهای کم‌هزینه درشهر تهران را نزدیک به مقادیر مشاهداتی پیش‌بینی کند.

پس از بررسی زیرمعیارهای پژوهش و تولید نقشه‌های روی هم‌گذاری شده با استفاده از عملگرهای فازی و همچنین پیش‌بینی نقشه نهایی با مدل‌های رگرسیونی OLS و GWR نقشه مشاهداتی SUM قابل‌اعتماد است و طبقه‌بندی مطلوبیت اراضی شهر تهران برای نصب حسگرهای کم‌هزینه برای پایش آلودگی هوا انجام شده است. می‌توان گفت که تقریباً ۱۶ هکتار از اراضی شهر تهران به‌صورت پراکنده در مناطق مرکزی، جنوبی، جنوب‌غربی و حتی در مواردی در شمال شهر تهران در نزدیکی بزرگراه‌ها، جایگاه سوخت، پایانه‌ها و ایستگاه‌های حمل و نقل و مراکز صنعتی که سطح آلودگی هوای بالایی دارند، اراضی مناسبی برای نصب حسگرهای کم‌هزینه جهت پایش آلاینده‌های هوا هستند (شکل ۱۱).

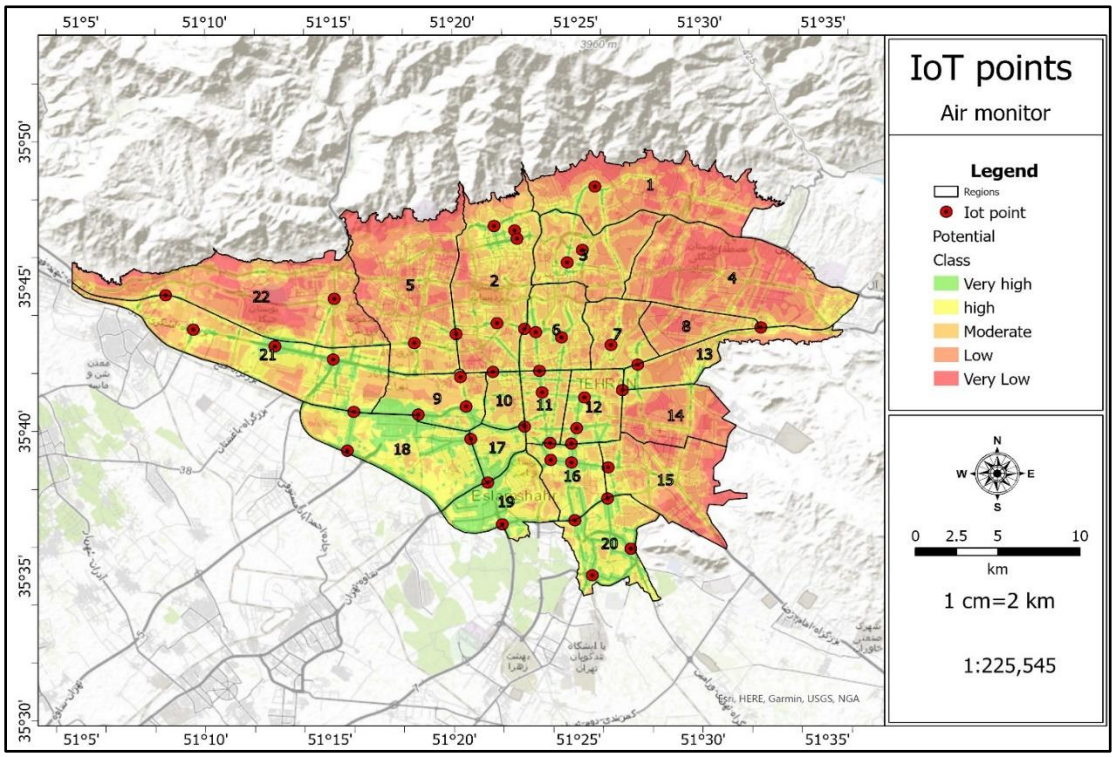


شکل ۱۱- نقشه‌های پیش بینی شده از مطلوبیت اراضی برای نصب حسگر با رگرسیون وزن دار جغرافیایی

Fig.11. Predicted maps of land suitability for sensor installation with geographic weighted regression

با بررسی نقشه‌های نهایی و همچنین زیرمعیارهای پژوهش و مشاهدات میدانی انجام شده، نقاطی برای نصب حسگرهای کم‌هزینه جهت پایش آلودگی هوای تهران برداشت و نهایی شده است. تعداد ۴۴ نقطه برای نصب حسگرها مناسب است که نقشه پراکنش آنها در سطح شهر تهران در شکل ۱۲ آورده شده است. همچنین در جدول ۶، مکان دقیق این نقاط مطلوب تهیه شده است.

نقشه نهایی نشان داد که حدود ۱۳ درصد از اراضی شهر تهران برای نصب حسگرها کاملاً مناسب هستند. این اراضی مطلوب دارای ویژگی‌هایی هستند که شامل: ۱) غلظت بالای ذرات معلق و گازهای آلاینده و ۲) نزدیک بودن به منابع آلودگی مانند سیستم‌های حمل‌ونقل شهری، جایگاه سوخت و مراکز صنعتی. هرچه به منابع آلودگی نزدیک‌تر باشیم، غلظت آلاینده‌های هوا نیز افزایش می‌یابد. نتایج این پژوهش نیز نشان داد که تراکم مراکز صنعتی و بزرگراه‌ها، پایانه‌های اتوبوسرانی و تاکسی‌رانی در مناطق جنوبی و جنوب‌غربی شهر تهران بسیار زیاد است و غلظت آلاینده‌های هوا به‌ویژه ذرات معلق در این مناطق نیز بالاتر از سایر مناطق شهر تهران است. البته الگوی باد نیز در پراکنش و توزیع فضایی غلظت آلاینده‌ها نقش غیرقابل انکاری دارد و جریان‌های افقی و عمودی هوا منجر به پخش آلاینده‌ها در مسیرهای خاصی می‌شود. در این پژوهش با توجه به اینکه غلظت هر یک از آلاینده‌ها هوا در پهنهٔ شهر تهران از ایستگاه‌های پایش مرجع به دست آمده است، پس نقش الگوهای باد نیز در نظر گرفته شده است، چون‌که غلظت‌های به‌دست آمده برای هر نوع آلاینده، حاصل‌از خروجی آلاینده‌ها از منابع انتشار و سپس پخش و پراکنش آنها تحت تاثیر الگوهای باد و جریان‌های جوی است. پس می‌توان به این نتیجه رسید که نقشه‌های تهیه شده از غلظت آلاینده‌ها در این پژوهش، علاوه‌بر اینکه منابع آلاینده را در بر گرفته است، بلکه نقش شرایط جوی و الگوهای باد را نیز در نظر گرفته است.



شکل ۱۲- نقاط پیشنهادی برای نصب حسگرهای کم هزینه برای پایش آلودگی هوای شهر تهران

Fig.12. Suggested points for installing low-cost sensors to monitor air pollution in Tehran

برای پایش آلودگی هوای شهری، بایستی نقاطی پایش شوند که سطح آلودگی آنها زیاد است و خطر آلودگی محیط‌زیست شهری، تشدید روند تغییر اقلیم، گرمایش جهانی و همچنین به‌خطر افتادن سلامت انسان و دیگر اجزای اکوسیستم در این نواحی زیاد است. به همین دلیل پژوهشگران پایش آلاینده‌ها را در نقاطی انجام می‌دهند که سطح آلودگی هوا بسیار زیاد است (Xie et al., 2017; Snyder et al., 2013). در این پژوهش نیز پیرو پژوهش‌های پیشین، مشاهدات میدانی و مصاحبه با کارشناسان و متخصصین علوم مهندسی محیط‌زیست، بیشترین امتیاز فازی برای نقاطی داده شد که سطح آلودگی آنها بیشتر از سایر مناطق است.

مهم‌ترین منابع آلودگی هوای شهری، سامانه حمل‌ونقل است که باعث ایجاد شرایطی می‌شود که منجر به تولید و انتشار آلاینده‌ها می‌شوند. سامانه حمل‌ونقل شهری تنها به حرکت خودروها ختم نمی‌شود، بلکه ایستگاه‌های اتوبوس‌رانی، متروها، ایستگاه تاکسی، پایانه‌های مسافربری، بزرگراه، آزادراه، بلوار و خیابان‌های شهری، نقاط توقف و پُرترافیک و همچنین احداث جایگاه سوخت، همگی عضوی از این سامانه محسوب می‌شوند (Abdallah, 2023). هر یک از این مجموعه‌ها به‌عنوان نقاطی محسوب می‌شوند که آلودگی هوا ایجاد می‌کنند، اما منبع تولید آلاینده یکی است، که همان خودروهایی است که از سوخت‌های فسیلی برای احتراق موتورهای داخلی خود استفاده می‌کنند. این ماشین‌های مکانیکی که دارای موتور احتراق داخلی هستند به چند دسته تقسیم می‌شوند که مهم‌ترین آنها خودروهای سواری سبک، خودروهای مسافربری، کامیون‌های باری سبک و سنگین، اتوبوس و موتورسیکلت است.

جدول ۶- محل نصب حسگرهای کم هزینه پایش آلودگی هوا در تهران

Table 6- Installation location of low-cost air pollution monitoring sensors in Tehran

منطقه Region	مکان نصب Location	منطقه Region	مکان نصب Location
20	بزرگراه آوینی، لبه بوستان گودرزی Avini Highway, edge of Goodarzi Park	2	بزرگراه چمران، دانشکده مدیریت دانشگاه تهران Chamran Highway, Faculty of Management, University of Tehran
20	تقاطع بزرگراه آوینی و بزرگراه امام علی (ع) Intersection of Avini Highway and Imam Ali Highway	2	تقاطع بزرگراه یادگار امام، بلوار پیام Intersection of Yadgar Imam Highway, Payam Boulevard
20	تقاطع بزرگراه آزادگان و بزرگراه شهید رجایی Intersection of Azadegan Highway and Shahid Rajaee Highway	2	میدان کاج Kaj Square
20	تقاطع بزرگراه آزادگان و فدائیان اسلام Intersection of Azadegan and Fedayan Islam Highways	2	تقاطع بزرگراه هاشمی رفسنجانی و بلوار سعادت‌آباد Intersection of Hashemi Rafsanjani Highway and Saadatabad Boulevard
19	تقاطع بزرگراه آزادگان و بزرگراه کاظمی Intersection of Azadegan Highway and Kazemi Highway	15	پل بعثت Besat Bridge
17	تقاطع بزرگراه کاظمی و بزرگراه چراغی Kazemi Highway and Cheraghi Highway Intersection	16	پمپ‌بنزین میدان بهمن Bahman Square Gas Station
17	تقاطع بزرگراه آیت‌الله سعیدی و بلوار معلم Intersection of Ayatollah Saeedi Highway and Moallem Boulevard	16	ترمینال جنوب تهران Tehran South Terminal
17	تقاطع بزرگراه نواب و خیابان قزوین Intersection of Navab Highway and Qazvin Street	11	میدان راه‌آهن Railway Square
18	تقاطع بزرگراه آزادگان و بلوار خلیج‌فارس Intersection of Azadegan Highway and Persian Gulf Boulevard	11	میدان حر Hor square
18	تقاطع بزرگراه فتح و بلوار خلیج‌فارس The intersection of Fath Highway and Persian Gulf Boulevard	6	میدان انقلاب Enghelab square
9	تقاطع بزرگراه فتح و ۲۵ متری زرند (شرکت پگاه) The intersection of Fath Highway and 25 meters from Zarand (Pegah Company)	6	دانشکده اقتصاد دانشگاه تهران Faculty of Economics, University of Tehran
9	میدان فتح Fath square	6	میدان جهاد Jahad square
9	میدان آزادی Azadi square	12	تقاطع خیابان شوش - خیابان تختی Intersection of Shush Street - Takhti Street
21	تقاطع بزرگراه آیت‌الله مهدوی کنی و کنارگذر لشکری Intersection of Ayatollah Mahdavi Kani Highway and Lashkari Bypass	12	میدان مولوی Molavi square
21	بزرگراه لشکری، روبه‌روی تعویض پلاک چیتگر Lashkari Highway, opposite Chitgar license plate exchange	12	متروی امام خمینی Imam Khomeini Metro
21	تقاطع بزرگراه لشکری و بلوار کرمان خودرو Intersection of Lashkari Highway and Kerman Khodro Boulevard	12	میدان شهدا Shohada square
22	پمپ‌بنزین وردآورد Vardavard Gas Station	13	بوستان امام علی - کنارگذر امام علی Imam Ali Park - Imam Ali Sidewalk
22	پمپ‌بنزین کوهک Kohak Gas Station	7	بیمارستان خانواده ارتش- پمپ بنزین Army Family Hospital - Gas Station
5	تقاطع شیخ فضل‌الله نوری و بزرگراه ستاری Sheikh Fazlullah Nouri Intersection and Sattari Highway	4	تقاطع بزرگراه یاسینی و شهید سلیمانی (پمپ‌بنزین) Intersection of Yasini and Shahid Soleimani Highways (gas station)
5	ایستگاه تاکسی بوستان استقلال Bustan Esteghlal Taxi Station	3	بیمارستان ولیعصر Valiasr Hospital
10	تقاطع یادگار امام و خیابان آزادی Intersection of Yadgar Imam and Azadi Street	3	بلوار ارتش غربی - جایگاه اختصاص ۱۴۷ تهران West Army Boulevard - Dedicated Stand 147, Tehran

2 بزرگراه جلال آل‌احمد، دانشگاه علامه طباطبایی
Jalal Al-Ahmad Highway, Allameh Tabatabaei University
1 میدان تجریش
Tajrish Square

احتراق سوخت (بنزین، گازوئیل و گاز مایع) در موتورهای داخلی این خودروها موجب انتشار آلاینده‌های هوا مانند اکسیدهای نیتروژن، دی‌اکسیدگوگرد، منوکسید کربن و ذرات معلق می‌شود که در ادامه آلاینده‌های ثانویه مانند ازن و PAN نیز حاصل تجزیه شیمیایی و ترکیب آلاینده‌های اولیه با اتمسفر می‌باشد (Ashok, Kumar, Jacob & Vignesh, 2022). بنابراین پایانه‌های حمل‌ونقل شهری، یکی از منابع انتشار آلاینده‌های هوا است که نتایج این پژوهش نیز نشان داد که در پایانه‌ها نیز غلظت آلاینده‌های هوا بیشتر از سایر نقاط است و این مراکز و پایانه‌ها می‌تواند به عنوان مکانی برای نصب حسگرها در نظر گرفته شود (Zarrar & Dyo, 2023).

علاوه بر سیستم حمل‌ونقل شهری، مراکز صنعتی که عمدتاً در حلقهٔ انتهایی شهر مستقر شده‌اند، یکی دیگر از منابع تولید آلاینده‌های هوا هستند. اگر مراکز صنعتی دارای دودکش باشند، آلاینده‌های زیادی وارد اتمسفر و هوای شهری خواهند کرد (Liu et al., 2021). نیروگاه‌های حرارتی برق یکی دیگر از مهم‌ترین منابع تولید آلاینده‌های هوا هستند، چون‌که در این نیروگاه‌ها، از سوخت‌های فسیلی (گاز و مازوت) برای تولید بخار و توربین‌ها استفاده می‌شود و موجب انتشار حجم زیادی از آلاینده‌ها به هوای شهری می‌شوند. متأسفانه در شهر تهران، مراکز صنعتی در غرب و جنوب غربی شهر مستقر شده‌اند و علاوه بر این، مراکز صنعتی متعددی نیز در مابین مگالاپلیس تهران - کرج و شهرهای اقماری غرب آن احداث شده است که باتوجه‌به مسیر بادهای غالب غربی در تهران، حجم زیادی از آلاینده‌ها وارد هوای شهری تهران می‌شوند. در اواخر پاییز و زمستان با تشدید وارونگی‌های دمایی (اینورژن)، غلظت این آلاینده‌ها به‌شدت افزایش یافته و خطر سرطان‌زایی را بسیار تشدید می‌کند؛ بنابراین منابع اصلی انتشار آلاینده‌های هوای شهر تهران، سیستم حمل‌ونقل شهری و مراکز صنعتی هستند که حجم زیادی آلاینده وارد اتمسفر شهری تهران می‌کنند.

نخستین گام برای مدیریت آلودگی هوای شهری توسط سازمان‌های نظارتی، پایش غلظت آلاینده‌های هوا است (Gulia, Nagendra, Khare & Khanna, 2015). به همین دلیل موضوع پایش به یکی از مسائل مهم مدیریت محیط‌زیست شهری تبدیل شده است. در شهرهای مهم جهان، علاوه‌بر مراکز پایش مرجع، پایش آلودگی هوا از طریق حسگرهای کم‌هزینه بر پایهٔ اینترنت اشیاء انجام می‌شود که بسیار کم‌هزینه بوده و قابلیت انعطاف‌پذیری برای سازگاری برای شرایط منطقه‌ای را دارد (Taştan, 2022). اما مکان نصب این پکیج‌های هوشمند و بَرخط در گام نخست قرار دارد. اینکه حسگرها کجا و به چه تعداد در یک شهر نصب شوند، یکی از مسائل مهمی است که این پژوهش در راستای این موضوع در شهر تهران انجام شد. پارامترهایی وجود دارند که برای انتخاب مکان مناسب برای نصب حسگر تاثیرگذارند. غلظت آلاینده‌های هوا و نزدیکی به منابع آلوده کنندهٔ هوا از مهم‌ترین پارامترها هستند که در این مطالعه نیز از آنها برای انتخاب نقاط مناسب برای نصب حسگرهای پایش آلودگی هوا در شهر تهران استفاده شد. نتایج نشان داد که غلظت ذرات معلق و نزدیک بودن به پایانه‌های مسافربری که تراکم اتوبوس‌ها، تاکسی و خودروهای باری و سواری در آنها بسیار زیاد است، بیشترین اهمیت را در انتخاب مکان مناسب برای نصب حسگرها دارند که در دیگر مطالعات نیز غلظت ذرات معلق به‌عنوان معیار اصلی در نظر گرفته شده است. نقاطی که سطح آلودگی زیاد بوده و غلظت ذرات معلق نیز بالا است، خطر تخریب محیط‌زیست و به‌خطرافتادن سلامت انسان را دارد. اما مناطقی که سطح آلودگی کم بوده و تاثیر زیادی بر محیط‌زیست شهری ندارد، نیاز چندانی به پایش آلاینده‌های هوا ندارد (Aamer, Mumtaz, Anwar & Poslad, 2018). به همین دلیل در این پژوهش، مکان‌هایی که آلودگی آنها به‌ویژه ذرات معلق زیاد است و به منابع آلودگی نزدیک هستند، امتیاز بالایی داده شد و برای نصب حسگرهای پایش انتخاب شدند.

روش‌های زمین‌آمار خودهمبستگی فضایی برای استخراج خوشه‌های خودهمبستهٔ مشاهداتی استفاده می‌شود و هر خوشه بیشترین همبستگی درون‌گروهی را دارد (Martínez-Minaya, Cameletti, Conesa & Pennino, 2018). شاخص موران و هات‌اسپات مهم‌ترین روش بررسی خودهمبستگی هستند. خوشه‌ها و یا لکه‌ها در این مدل‌ها نشان می‌دهند که این نقاط دارای مقادیر نزدیک

بهم هستند و با خوشه‌های دیگر تفاوت دارند. در این پژوهش از این مدل‌ها برای خوشه‌بندی اراضی مناسب و نامناسب استفاده شد که نشان داد اراضی که دارای غلظت آلودگی زیادی هستند و به منابع آلودگی نزدیک هستند، در خوشه‌های داغ (نقاط مستعد نصب حسگر) قرار گرفته و بیشترین همبستگی در این خوشه مشاهده شد؛ اما در لکه‌های سرد، همبستگی‌های درون لکه منفی بود و نشان می‌دهد که در این لکه‌ها غلظت آلاینده‌ها کم است و از منابع انتشار آلودگی فاصله دارند که باعث شد خودهمبستگی درون خوشه و یا لکهٔ سرد کاهش یابد و برای نصب حسگر مناسب نیستند. این مدل‌های خودهمبستگی فضایی با عدد و فضای جغرافیایی ارتباط دارد که پژوهشگران برای خوشه‌بندی فضایی داده‌های غلظت آلاینده‌ها (Nadian, Mirzaei & Soltani Mohammadi, 2018)، ترافیک شهری (Gedamu, Plank-Wiedenbeck & Wodajo, 2024)، درجه خشکسالی (Azizi & Sadeghi, 2023)، مکان‌یابی پروژه‌ها (Saini, 2024)، شناسایی مناطق پر خطر و کم خطر (Tsui, Derumigny, Peck, Van Timmeren & Wandl, 2022) استفاده می‌کنند.

نتیجه‌گیری

ایستگاه‌های پایش کم‌هزینه که در نقاط شهری واقع شده‌اند، می‌توانند به‌اندازه کافی اطلاعات مربوط به مناطقی که تنوع فضا و آلودگی در آنها قابل‌توجه است، را ارائه دهند. بدیهی است که استفاده از این ایستگاه‌های پایش آنلاین و کم هزینه با در دسترس بودن مانیتورهای ارزان قیمت برای نمایش اطلاعات آن در سطح شهر و یا نصب بر روی پلتفرم‌های موجود امکان‌پذیر است؛ اما اطلاعات حاصل از این رویکرد بایستی به‌درستی ارزیابی و کنترل شود. شبکه این مانیتورها که به‌درستی بر اساس مکان‌های مناسب تعریف‌شده قرار گرفته‌اند، امکان رسیدگی به پایش کیفیت هوای متراکم فضایی را در سطح شهر فراهم می‌کنند و از مدیریت کیفیت هوای شهری قابل‌اعتمادتر با نصب و نگهداری سبک‌تر اطمینان می‌دهند.

اراضی که حداقل ۲۰۰ متر از منابع آلودگی فاصله دارند و غلظت آلاینده‌ها در آن زیاد نیست، برای نصب حسگر مناسب نیستند و حدود ۲۰، ۲۰ و ۲۹ درصد از آن‌ها به‌ترتیب تقریباً نامناسب، نامناسب و کاملاً نامناسب هستند. می‌توان در ۴۴ نقطه از شهر تهران که مطلوبیت بالایی دارند، پکیج‌های حسگر کم‌هزینه برای پایش آلاینده‌های هوای شهری نصب کرد که عمدتاً در مناطق مرکزی، جنوبی و جنوب‌غربی شهر تهران قرار دارند. هزینه هر پکیج حدود ۹۰۰ دلار است که مجموع هزینه‌ها برای کل شهر حدود ۴۰۰ هزار دلار خواهد بود (معادل بیست میلیارد ریال)؛ در حالی‌که برای احداث یک ایستگاه پایش معمولی که در سطح شهر موجود است، حدود ۸۰ میلیارد ریال هزینه صرف می‌شود. بنابراین حسگرهای کم‌هزینه بسیار مقرون به‌صرفه هستند.

اگرچه پکیج‌ها کم‌هزینه هستند، اما چالش‌هایی وجود دارد که بایستی مورد ارزیابی و تحلیل قرار بگیرند.

(۱) حسگرهای کم‌هزینه نیاز به پردازش دقیق و صحیحی از اطلاعات با استفاده از هوش مصنوعی دارند، اگر خطایی در تولید اطلاعات به وجود آید، قابل‌جبران نیست و اطلاعات نادرست در اختیار سازمان قرار می‌دهد.

(۲) اطلاعات نادرست موجب برنامه‌ریزی اشتباه برای مدیریت آلودگی می‌شود. اگر مدیریت صحیح انجام نشود، محیط‌زیست شهری به خطر می‌افتد.

(۳) سازمان‌های متولی و نظارتی در ایران به‌سختی به حسگرهای اینترنت اشیا اعتماد می‌کنند و شرکت‌های دانش‌بنیان در این زمینه حمایتی نشده‌اند. درحالی‌که ایستگاه‌های موجود دچار نقص فنی می‌شوند و اطلاعات آن ارائه نمی‌شود، ولی بازهم سازمان‌ها به پایش حسگرها اعتماد ندارند.

(۴) رخدادها و بلایای طبیعی و انسانی می‌تواند موجب ازکارافتادن و یا خرابی پکیج حسگر شود، بنابراین مدیریت آن نیاز به سرکشی دقیق و با برنامه دارد.

باوجود چالش‌هایی که در این زمینه وجود دارد، راهکارهای ساده‌ای نیز برای آن قابل تدوین و اجرا است:

(۱) سازمان متولی بایستی شرکت‌های دانش‌بنیان را تشویق به تولید حسگرها و پکیج‌ها آن کند. تولید حسگرها فناوری پیچیده و یا سختی ندارد و نخبگان کشور قادر به تولید آن در حجم انبوه هستند.

(۲) حسگرها در مکان درست نصب شوند و با این کار خطر تخریب و نقص فنی آن به حداقل می‌رسد.

(۳) تولید قطعات پکیج به‌ویژه حسگرها توسط شرکت‌های دانش‌بنیان باعث می‌شود تا وابستگی به خارج از بین برود و تعمیر سریع پکیج توسط متخصصین داخلی انجام شود.

(۴) تشکیل گروه تخصصی از مهندسین برق، انرژی، محیط‌زیست و عمران شهری می‌تواند به‌راحتی پکیج حسگرهای کم‌هزینه را در سطح شهر تهران راه‌اندازی کنند.

آلاینده‌ترین نقاط بر اساس شش نوع آلایندهٔ هوا می‌تواند مکان مناسبی برای نصب این حسگرها باشد و البته به‌گونه‌ای که کل فضای شهر را پوشش دهد. با اجرای این روش، امکان پایش آلاینده‌های اصلی هوا در لحظه مهیا می‌شود و برنامه‌ریزی برای کنترل آلودگی نیز تسهیل می‌گردد. اگرچه در این پژوهش از عوامل منابع آلودگی و غلظت آلاینده‌های هوا برای جانمایی حسگرها استفاده شد، اما برای این‌که حسگرهایی در شهر نصب کرد که جنس و نوع ذرات را تفکیک و شناسایی کند، شناخت نوع منابع انتشار حائز اهمیت خواهد بود. بنابراین پیشنهاد می‌گردد که محققین در مطالعات آتی، کاربرد حسگرها در تفکیک ذرات و منابع انتشار آلاینده-های هوا استفاده نمایند.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از شرکت کنترل کیفیت هوای شهرداری تهران و همچنین ایستگاه‌های هواشناسی شهر تهران به‌دلیل در دسترس قرار دادن اطلاعات مربوط به کیفیت هوا و اطلاعات هواشناسی، کمال تشکر و قدردانی دارند.

References

Aamer, H., Mumtaz, R., Anwar, H., & Poslad, S. (2018). A very low cost, open, wireless, internet of things (iot) air quality monitoring platform. Paper presented at the Proceedings of the 15th International Conference on Smart Cities: Improving Quality of Life Using ICT & IoT (HONET-ICT) (pp. 102-106). IEEE. http://dx.doi.org/10.1109/HONET.2018.8551340

Abdallah, T. (2023). *Sustainable mass transit: challenges and opportunities in urban public transportation*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2022-0-01297-6

Ashok, B., Kumar, A. N., Jacob, A., & Vignesh, R. (2022). *Emission formation in IC engines. In NOx Emission Control Technologies in Stationary and Automotive Internal Combustion Engines*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2020-0-01213-2

Azizi, A., & Sadeghi, R. (2023). Spatial Analysis of Migration and Drought in Iran using Hot Spot Analysis and Standardized Precipitation Index. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *12*(2), 81-100. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76710.1230

De Vito, S., Esposito, E., Castell, N., Schneider, P., & Bartonova, A. (2020). On the robustness of field calibration for smart air quality monitors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *310*, 127869. https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.127869

Dimitriou, K., Stavroulas, I., Grivas, G., Chatzidiakos, C., Kosmopoulos, G., Kazantzidis, A., ... & Gerasopoulos, E. (2023). Intra-and inter-city variability of PM2. 5 concentrations in Greece as determined with a low-cost sensor network. *Atmospheric Environment*, *301*, 119713. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119713

Fattoruso, G., Agresta, A., Guarnieri, G., Lanza, B., Buonanno, A., Molinara, M., ... & Di Francia, G. (2015). Optimal sensors placement for flood forecasting modelling. *Procedia Engineering*, *119*, 927-936. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.971

Ganji, A., Youssefi, O., Xu, J., Mallinen, K., Lioyd, M., Wang, A., & Hatzopoulou, M. (2023). Design, calibration, and testing of a mobile sensor system for air pollution and built environment data collection: The urban scanner platform. *Environmental Pollution*, *317*, 120720. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120720

Gedamu, W. T., Plank-Wiedenbeck, U., & Wodajo, B. T. (2024). A spatial autocorrelation analysis of road traffic crash by severity using Moran's I spatial statistics: A comparative study of Addis Ababa and Berlin cities. *Accident Analysis & Prevention*, *200*, 107535. https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107535

Gu, H., Yan, W., Elahi, E., & Cao, Y. (2020). Air pollution risks human mental health: an implication of two-stages least squares estimation of interaction effects. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(2), 2036-2043. https://doi.org/10.1007/s11356-019-06612-x

Gu, K., Zhou, Y., Sun, H., Dong, F., & Zhao, L. (2021). Spatial distribution and determinants of PM 2.5 in China's cities: Fresh evidence from IDW and GWR. *Environmental Monitoring and Assessment*, *193*, 1-22. https://doi.org/10.1007/s10661-020-08749-6

Gulia, S., Nagendra, S. S., Khare, M., & Khanna, I. (2015). Urban air quality management-A review. *Atmospheric Pollution Research*, *6*(2), 286-304. https://doi.org/10.5094/APR.2015.033

Gurram, M. K., Bulusu, L. D., & Kinthada, N. R. (2015). Urban environmental quality assessment at ward level using AHP based GIS multi-criteria modeling–a study on Hyderabad City, India. *Asian Journal of Geoinformatics*, *15*(3), 16-29.

Li, H. Z., Gu, P., Ye, Q., Zimmerman, N., Robinson, E. S., Subramanian, R., ... & Presto, A. A. (2019). Spatially dense air pollutant sampling: Implications of spatial variability on the representativeness of stationary air pollutant monitors. *Atmospheric Environment: X*, *2*, 100012. https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100012

Li, Y. M., Khan, M., Khurshid, A., Gulistan, M., Rehman, A. U., Ali, M., ... & Farooque, A. A. (2023). Designing pentapartitioned neutrosophic cubic set aggregation operator-based air pollution decision-making model. *Complex & Intelligent Systems*, *9*(5), 4765-4782. https://doi.org/10.1007/s40747-023-00971-2

Liu, H. J., Sun, Y. N., & Chen, M. H. (2017). Dynamic correlation and causes of urban haze pollution. *China Popul. Resour. Environ*, *27*, 74-81. https://doi.org/10.1007/s11442-022-1975-8

Liu, Y., Ming, T., Peng, C., Wu, Y., Li, W., De Richter, R., & Zhou, N. (2021). Mitigating air pollution strategies based on solar chimneys. *Solar Energy*, *218*, 11-27. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.02.021

Lu, B., Yang, W., Ge, Y., & Harris, P. (2018). Improvements to the calibration of a geographically weighted regression with parameter-specific distance metrics and bandwidths. *Computers, Environment and Urban Systems*, *71*, 41-57. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.03.012

Martínez-Minaya, J., Cameletti, M., Conesa, D., & Pennino, M. G. (2018). Species distribution modeling: a statistical review with focus in spatio-temporal issues. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *32*, 3227-3244. https://doi.org/10.1007/s00477-018-1548-7

Miskell, G., Alberti, K., Feenstra, B., Henshaw, G. S., Papapostolou, V., Patel, H., ... & Williams, D. E. (2019). Reliable data from low cost ozone sensors in a hierarchical network. *Atmospheric Environment*, *214*, 116870. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116870

Nadian, M., Mirzaei, R., & Soltani Mohammadi, S. (2018). Application of Moran'sI Autocorrelation in Spatial-Temporal Analysis of PM2.5 Pollutant (A case Study: Tehran City). *Journal of Environmental Health Enginering*, *5*(3), 197-213. [In Persian] http://dx.doi.org/10.29252/jehe.5.3.197

Saini, I. M. (2024). Spatial Autocorrelation of Tuberculosis Cases in Central Java Province in 2022. *Jurnal Biostatistik, Kependudukan, dan Informatika Kesehatan*, *4*(3), 1, 90-99. http://dx.doi.org/10.20473/jbk.v13i1.2024.90-99

Sayahi, T., Butterfield, A., & Kelly, K. E. (2019). Long-term field evaluation of the Plantower PMS low-cost particulate matter sensors. *Environmental Pollution*, *245*, 932-940. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.065

Schwela, D., Haq, G., Huizenga, C., Han, W. J., Fabian, H., & Ajero, M. (2012). *Urban air pollution in Asian cities: status, challenges and management*. Routledge.

Shen, H., Hou, W., Zhu, Y., Zheng, S., Ainiwaer, S., Shen, G., ... & Tao, S. (2021). Temporal and spatial variation of PM2. 5 in indoor air monitored by low-cost sensors. *Science of The Total Environment*, *770*, 145304. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145304

Snyder, E. G., Watkins, T. H., Solomon, P. A., Thoma, E. D., Williams, R. W., Hagler, G. S., ... & Preuss, P. W. (2013). The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science & Technology*, *47*(20), 11369-11377. https://doi.org/10.1021/es4022602

Sung, Y., Lee, S., Kim, Y., & Park, H. (2019). Development of a smart air quality monitoring system and its operation. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, *13*(1), 30-38. http://dx.doi.org/10.5572/ajae.2019.13.1.030

Tagle, M., Rojas, F., Reyes, F., Vásquez, Y., Hallgren, F., Lindén, J., ... & Oyola, P. (2020). Field performance of a low-cost sensor in the monitoring of particulate matter in Santiago, Chile. *Environmental Monitoring and Assessment*, *192*(3), 171. https://doi.org/10.1007/s10661-020-8118-4

Tan, Y., Lipsky, E. M., Saleh, R., Robinson, A. L., & Presto, A. A. (2014). Characterizing the spatial variation of air pollutants and the contributions of high emitting vehicles in Pittsburgh, PA. *Environmental Science & Technology*, *48*(24), 14186-14194. https://doi.org/10.1021/es5034074

Taştan, M. (2022). A low-cost air quality monitoring system based on Internet of Things for smart homes. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, *14*(5), 351-374. https://doi.org/10.3233/AIS-210458

Toscano, D., & Murena, F. (2020). The effect on air quality of lockdown directives to prevent the spread of SARS-CoV-2 pandemic in Campania Region—Italy: indications for a sustainable development. *Sustainability*, *12*(14), 5558. https://doi.org/10.3390/su12145558

Tsui, T., Derumigny, A., Peck, D., Van Timmeren, A., & Wandl, A. (2022). Spatial clustering of waste reuse in a circular economy: A spatial autocorrelation analysis on locations of waste reuse in the Netherlands using global and local Moran's I. *Frontiers in Built Environment*, *8*, 954642. https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.954642

UNION, P. (2008). Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. *Official Journal of the European Union*. http://data.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj

World Health Organization. (2021). *Review of evidence on health aspects of air pollution: REVIHAAP project: technical report* (No. WHO/EURO: 2013-4101-43860-61757). World Health Organization. Regional Office for Europe. WHO/EURO:2013-4101-43860-61757

Xie, X., Semanjski, I., Gautama, S., Tsiligianni, E., Deligiannis, N., Rajan, R. T., ... & Philips, W. (2017). A review of urban air pollution monitoring and exposure assessment methods. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *6*(12), 389. https://doi.org/10.3390/ijgi6120389

Yang, X., Wang, S., Zhang, W., Zhan, D., & Li, J. (2017). The impact of anthropogenic emissions and meteorological conditions on the spatial variation of ambient SO2 concentrations: A panel study of 113 Chinese cities. *Science of the Total Environment*, *584*, 318-328. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.145

Zarrar, H., & Dyo, V. (2023). Drive-by air pollution sensing systems: Challenges and future directions. *IEEE Sensors Journal*, *23*(19), 23692-23703. http://dx.doi.org/10.36227/techrxiv.21999125.v2

Vol.14, No.2, Summer 2025, p.173-198 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2025.87795.1479 OPEN ACCESS

Evaluation of Drought Risk and Its Consequences for the Sustainability of Rural Tourism: A Case Study of Torshiz

Fahimeh Jafari[1], Khadijeh Bouzarjomehri[2]*, Hasanali Faraji sabokbar[3], Hamdolah Sojasi Qidari[4]

[1] PhD Candidate, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

[2, 4] Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Literature, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

[3] Professor, Department of Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 01 May 2024

Revised: 07 January 2025

Accepted: 20 January 2025

Available Online: 20 January 2025

Keywords:

Rural Tourism Sustainability

Drought Risk Assessment

Standardized Precipitation Index (SPI)

Tourism Vulnerability Analysis

Torshiz Region

ABSTRACT

Rural tourism is one of the most important economic activities, playing a significant role in reducing unemployment, increasing income, and promoting rural sustainability. However, this industry is highly sensitive to climatic hazards, especially drought, which can have negative and potentially irreversible impacts on rural tourism destinations. This study aims to investigate the effects of drought hazards on the sustainability of tourism destination villages in the Torshiz region. In this study, monthly rainfall data from eight synoptic stations over the 2000–2020 period were used to assess regional drought conditions. The Standardized Precipitation Index (SPI) was calculated using DRINC software. Subsequently, annual drought maps were produced to examine temporal drought trends over the studied years. The obtained SPI values indicated that the study area experienced drought conditions during the two-decade period. A researcher-made questionnaire was employed to investigate the impacts of drought on rural tourism destinations. Opinions were collected from 30 professionals, including local experts, professors, and doctoral students specializing in rural tourism and hazards. A snowball sampling technique was used to select participants. The MEREC method was then applied to prioritize the research components. The results of the SPI calculations indicated that the study area experienced mild but recurrent drought conditions during the 2000–2020 period. The MEREC model results showed that among the factors affecting the impacts of drought (socio-cultural, economic, physical-infrastructural, and environmental), economic factors (with a weight of 0.2517) and environmental factors (with a weight of 0.2505) had the greatest impact on the sustainability of tourism destination villages.

*Corresponding Author: Dr. Khadijeh Bouzarjomehri E-mail Address: azar1334@gmail.com

How to cite this article: Jafari, F., Bouzarjomehri, Kh., Faraji Sabokbar, H. A., & Sojasi Qidari, H. (2025). Evaluation of Drought Risk and Its Consequences for the Sustainability of Rural Tourism: A Case Study of Torshiz. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(2), 173-198. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.87795.1479

©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

Rural tourism, a sub-branch of tourism, emerged as a socio-recreational activity in Europe during the second half of the 18th century. Subsequently, in the 19th and 20th centuries, the development of railway transportation facilitated access to rural tourism destinations. This period witnessed a significant increase in international tourism demand for rural destinations, gradually paving the way for sustainable tourism development. While rural tourism destinations can have both positive and negative impacts in the aforementioned areas, this industry is one of the most vulnerable to hazards. Various threats and risks can destabilize tourism.

Among natural hazards, drought is one of the most significant and ancient phenomena that humans have been familiar with since ancient times. This phenomenon is more complex than other natural disasters and affects a larger segment of society. Due to various reasons, humans cannot accurately predict many events. Uncertainty is always present, and therefore, risk is inevitable.

Tourism, due to its sensitive nature, is particularly vulnerable to the increasing occurrence of extreme events such as drought, which can negatively affect a destination. Drought has both direct and indirect effects on tourism and can occur throughout the year. Consequently, comprehensive assessments of the impacts of drought on tourism, along with its direct inclusion in drought management strategies, are fundamentally essential, although they have not been commonly conducted in relation to tourism until now.

Given the significant negative impacts and damages that environmental hazards, especially droughts, can inflict on the tourism sector—particularly in rural areas where the local economy is reliant on tourism—this study aims to investigate the effects of drought on the sustainability of rural tourism destinations. The findings of this research can be used to inform planning for risk management and the development of rural tourism in the Torshiz region.

Material and Methods

This research is applied in nature and is conducted using a descriptive-analytical method. Data were collected through documentary and field (questionnaire) methods. Due to the lack of sufficient data in all the studied counties, and in order to perform zoning based on the SPI index, monthly precipitation data from 8 synoptic stations in the provinces of Razavi Khorasan, Southern Khorasan, and Shahrood County were used for the statistical period from 2000 to 2020.

Drought analysis of the study area was conducted based on monthly precipitation data obtained from the National Meteorological Organization. The DRINC software was used to calculate the SPI. Finally, the corresponding zoning maps were drawn using ArcGIS 10.6.1. Furthermore, after assessing the drought hazard situation in the study area, a researcher-made questionnaire administered to 30 experts was used to examine the effects of drought on the sustainability of rural tourism destinations in the Torshiz region. The research samples were selected using the snowball sampling method. Subsequently, the MEREC weighting method was used to prioritize the effects of drought on rural tourism destinations.

Results and Discussion

According to the results of the SPI index for the decade from 2000 to 2010, and based on the standard precipitation index divisions, a drought occurs when the SPI is less than -0.99. Therefore, the SPI value at all stations was negative in 2008 and 2009, and all stations except Tabas and Boshrooyeh had an SPI not exceeding -2, indicating a severe drought in the study area.

Moreover, drought occurs when the Standardized Precipitation Index (SPI) exhibits negative sequences. When SPI values reach or fall below -1, drought conditions intensify. The positive trend of the SPI indicates the end of the drought period. Therefore, the findings show that the study area experienced slightly moist conditions only in 2009–2010 during the statistical period of 2000–2010, and in other years (2000–2009), it faced mild drought conditions. The continuation of this drought trend can have irreversible impacts on rural tourism destinations in the Torshiz region.

The results of the SPI index for the years 2010 to 2020 indicate that the SPI values were negative in most years and stations. Given that a drought occurs when the Standardized Precipitation Index exhibits negative sequences, the findings suggest that the study area experienced mild drought conditions.

The results of the SPI index zoning in the study area indicate that the region experienced mild to severe droughts during the period from 2000 to 2020. Overall, the SPI values show that in most stations within the study area and in most years, the SPI values were less than -0.99, indicating persistent mild drought in the region.

To assess the impacts of this hazard on rural tourism destinations, a questionnaire was distributed to 30 experts, faculty members, and doctoral students in the fields of tourism and hazards. Subsequently, the MEREC weighting method was employed to prioritize the impacts of drought on the sustainability of rural tourism destinations in the study area. The final results of this model indicate that among the individual-social, economic, physical-infrastructural, and environmental impacts, the first and second ranks were assigned to the economic and environmental impacts, respectively. In other words, the drought hazard has the greatest impact on the economy and then the environment of the villages in the study area, thus leading to the instability of rural tourism destinations.

Furthermore, based on the analysis of the components, it can be concluded that the drought hazard has the greatest impact on reducing employment opportunities in the tourism sector, decreasing agricultural and horticultural production, bankrupting rural entrepreneurial activities, destroying rural farms and orchards, and reducing the income of employees (directly and indirectly) in the tourism sector.

Conclusion

The results of the SPI index indicated that the study area has been experiencing drought conditions. Additionally, the impacts of drought on rural tourism destinations in the Torshiz region were investigated. The effects of drought on the sustainability of rural tourism were examined through four influencing factors (economic, socio-individual, physical-infrastructural, and environmental) and 43 components. The results showed that among the four dimensions, drought had the greatest impact on the economic and then the environmental aspects of rural tourism.

These factors exert long-term negative impacts on rural tourism, particularly those activities reliant on geographical assets and scenic landscapes. The results highlight that drought significantly affects employment opportunities in the tourism sector. Consequently, agricultural production declines, vegetation cover is degraded, and rural farms and orchards are threatened, undermining the potential for agricultural tourism.

The overall deterioration of the rural landscape leads to a decrease in tourist arrivals, which in turn results in the failure of rural entrepreneurial ventures and the eventual closure of tourism-related activities. Ultimately, the reduction in tourist arrivals and tourism income destabilizes the rural economy. Given the significant role of tourism in rural destinations, it is imperative for managers and planners to take substantial measures to manage hazards and minimize their negative impacts, thereby ensuring the sustainability of rural tourism destinations.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to Dr. Bozorjomehri, Dr. Faraji Sabkbar, and Dr. Sojasi for their careful review of this manuscript and their insightful comments.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۱۹۸-۱۷۳

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.87795.1479 دسترسی آزاد

ارزیابی مخاطره خشکسالی و اثرات آن بر ناپایداری روستاهای مقصد گردشگری مورد مطالعه: روستاهای مقصد گردشگری منطقه ترشیز

فهیمه جعفری[۱]، خدیجه بوزرجمهری[۲*]، حسنعلی فرجی سبکبار[۳]، حمدالله سجاسی قیداری[۴]

[۱] دانشجوی دکتری گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

[۲،۴] دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

[۳] استاد گروه جغرافیا، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

کلمات کلیدی:

پایداری گردشگری روستایی

ارزیابی ریسک خشکسالی

شاخص استاندارد بارش(SPI)

تحلیل آسیب‌پذیری گردشگری

منطقه ترشیز

چکیده

صنعت گردشگری در مناطق روستایی یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های اقتصادی محسوب می‌شود که نقش مهمی در کاهش بیکاری، افزایش درآمد و ماندگاری و پایداری روستاها دارد. اما این صنعت نسبت به مخاطرات آب و هوایی بخصوص مخاطره خشکسالی بسیار حساس بوده و بروز مخاطرات می‌تواند اثرات منفی و جبران ناپذیری در روستاهای مقصد گردشگری برجای گذارد. از این رو پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات مخاطره خشکسالی بر پایداری روستاهای مقصد گردشگری منطقه ترشیز انجام گرفته است. در این راستا برای بررسی وضعیت خشکسالی منطقه از داده‌های بارندگی ۸ ایستگاه سینوپتیک در طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ در مقیاس ماهانه استفاده شد. ابتدا با استفاده از نرم‌افزار DRINC مقادیر شاخص SPI محاسبه شد سپس جهت بررسی روند خشکسالی در سال‌های موردنظر، نقشه‌های پهنه‌بندی سالانه تهیه شد، مقادیر بدست آمده از شاخص SPI نشان داد منطقه مورد مطالعه در طی دوره آماری (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰) در محدوده خشکسالی قرار گرفته است. براین اساس در ادامه جهت بررسی اثرات خشکسالی بر روستاهای مقصد گردشگری از ابزار پرسشنامه محقق ساخته استفاده شد. بدین ترتیب از نظرات ۳۰ نفر از کارشناسان منطقه، اساتید و دانشجویان دکتری فعال در حوزه گردشگری روستایی و مخاطرات، جهت ارزیابی میزان اثر هریک از مؤلفه‌های تحقیق بهره گرفته شد. نمونه‌گیری به شیوه گلوله برفی انجام شد. سپس جهت اولویت‌بندی مؤلفه‌های تحقیق از روش وزن‌دهی MEREC استفاده شد. نتایج حاصل از محاسبه شاخص SPI نشان داد در طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ منطقه موردمطالعه با خشکسالی خفیف مواجه بوده است و نتایج حاصل از مدل MEREC نشان داد از میان عوامل اثرات خشکسالی (فردی- اجتماعی، اقتصادی، کالبدی-زیرساختی و محیطی)، عامل-های اقتصادی (با وزن ۰/۲۵۱۷) و محیطی (با وزن ۰/۲۵۰۵) بیشترین تأثیر را بر پایداری روستاهای مقصد گردشگری دارد.

*نویسنده مسئول: دکتر خدیجه بوزرجمهری E-mail: azar1334@gmail.com

مقدمه

در حال حاضر توسعه صنعت گردشگری به عنوان یکی از صنایع مهم در قرن ۲۱ در جهان شناخته شده است (Miller, 2021). اهمیت اقتصادی و اجتماعی این صنعت در بخش‌های اشتغال و درآمد، گسترش صادرات و ترویج ارزش‌های فرهنگی و محیطی در کشورهای توسعه یافته و توسعه نیافته بسیار ضروری است (Nepal, Al Irsyad & Nepal, 2019). در این میان یکی از زیرشاخه‌های گردشگری، گردشگری روستایی است که به عنوان یک فعالیت تفریحی- اجتماعی در نیمه دوم قرن هیجدهم در اروپا شکل گرفت و بعد از آن در قرن نوزدهم و بیستم با بسترسازی حمل‌ونقل ریلی و سهولت جابه‌جایی، دسترسی به مقصدهای گردشگری روستایی را آسان کرد. در این زمان شاهد گسترش چشمگیر تقاضاها گردشگری بین‌المللی از مقصدهای گردشگری روستایی هستیم که بتدریج زمینه توسعه پایدار گردشگری را فراهم کرد. از آنجا که مقاصد گردشگری روستایی دارای پتانسیل بسیار بالایی در زمینه داشتن شرایط طبیعی و مورفولوژیکی؛ شیوه زندگی، آداب و رسوم فرهنگی؛ صنایع دستی و محلی؛ جاذبه‌های بکر پیرامونی؛ گیاهان خاص و کمیاب (گیاهان دارویی)؛ آثار تاریخی و باستانی؛ غذاهای محلی و سنتی؛ فعالیت‌های ورزشی و بسترهای اکوتوریسمی، فرهنگی و اجتماعی هستند، سبب شده که زمینه جذب گردشگران را فراهم کند و پیامدهای مهمی در ابعاد پایدار اقتصادی (اشتغال‌زایی، درآمدزایی، سرمایه‌گذاری)(Chin, Lo, Songan & Nair, 2014). در بعد اجتماعی (بهبود اجتماع محل و بقای فرهنگ؛ کاهش فقر، بهبود کیفیت زندگی، آگاهی افراد محلی)(Dewi, 2014)، در بعد زیست‌محیطی (حفظ محیط‌زیست، تخریب محیط‌زیست)(Mohammadi & Mirtaghian Rudsari, 2016) و بعد کالبدی (بهبود زیرساخت‌ها، تسهیل در حمل‌ونقل و ارتباطات) را برای مردم روستایی فراهم کند (Anabestani, Jafari & Ataei, 2023; Anabestani, Einali & Roumiyani, 2018). به همین دلیل بسیاری از برنامه‌ریزان و جامعه‌شناسان روستایی از توسعه فعالیت‌ها در مقصدهای گردشگری بعنوان رکن اصلی توسعه پایدار روستایی یاد می‌کنند. با توجه به اینکه مقاصد گردشگری روستایی می‌تواند پیامدهای مثبت و منفی در ابعاد فوق به دنبال داشته باشد، اما این صنعت یکی از آسیب‌پذیرترین صنایع در برابر مخاطرات است و حوادث و خطراتی آن را تهدید می‌کنند که سبب ناپایداری گردشگری می‌شود (Bapiri, 2012). به عبارتی فضاهای روستایی، به منزله یکی از رایج‌ترین مقاصد گردشگری، از قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی مصون نیستند؛ زیرا اشتغال و معیشت روستاییان تا حد زیادی به زمین، خاک، آب و غیره وابسته است. این وابستگی روستاییان را بیشتر در معرض خطرات طبیعی قرار می‌دهد (Rajaei, 2003; Jafari, Shayan & Bataghva Sarabi, 2020). در بین مخاطرات طبیعی، خشکسالی یکی از مهمترین و قدیمی‌ترین بلایای طبیعی می‌باشد که انسانها از دیر باز با آن آشنا بوده‌اند (Salehpour, Azizy, Karimi & Zari Ghasemian, 2018). این پدیده از سایر بلایای طبیعی پیچیده‌تر و بخش‌های بیشتری از جامعه را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. تلاش برای تشخیص نقاط حادثه خیز و خطرآفرین این پدیده به منظور پیشگیری از بروز حوادث از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به دلایل مختلف، انسان نمی‌تواند بسیاری از حوادث را به درستی پیش‌بینی کند. عدم قطعیت همیشه وجود داشته است و به همین خاطر ریسک اجتناب ناپذیر است (Zhang, 2004) و اثرات منفی بسیاری بر جای می‌گذارد؛ خشکسالی مسبب پیامدهای زیست محیطی و اقتصادی فراوانی در محیط روستا می‌باشد که این عوامل در دراز مدت بر فعالیت گردشگری روستایی که مرتبط با سرمایه‌های جغرافیایی و کیفیت مناظر طبیعی روستاها است، اثر می‌گذارد. خشکسالی از یک طرف با کاهش منابع آب، کاهش فعالیت‌های کشاورزی و از بین رفتن پوشش گیاهی باعث تغییر در ساخت مناظر طبیعی روستا می‌شود، از طرف دیگر با کاهش تولیدات زراعی و دامی، مشکلات اقتصادی فراوانی را در محیط روستا باعث شده که در نتیجه آن روستائیان

توانایی مالی لازم برای انجام فعالیت‌های خدماتی مرتبط با گردشگری روستایی از جمله فروش محصولات جانبی و صنایع دستی را نخواهد داشت. مجموعه این عوامل بر گردشگری روستایی به عنوان یکی از مهمترین صنایع دارای پتانسیل‌های لازم برای کمک به توسعه فعالیت‌های اقتصادی جوامع محلی، تأثیر منفی خواهد داشت (Tsai, Tseng, Tzeng & Wu, 2012). در این راستا گردشگری به دلیل ماهیت حساس آن به ویژه در برابر افزایش وقوع رویدادهای شدید مانند خشکسالی آسیب‌پذیر است و می‌تواند در یک مقصد تأثیر منفی بگذارد. خشکسالی اثرات مستقیم و غیرمستقیم بر گردشگری دارد و می‌تواند در تمام فصول سال این اثرات وجود داشته باشد (Li, Goh, Hung & Li, 2018). در نتیجه، ارزیابی‌های منسجم اثرات خشکسالی بر گردشگری، همراه با گنجاندن مستقیم در استراتژی‌های مدیریت خشکسالی اساساً ضروری است، اگرچه تاکنون معمولاً برای گردشگری انجام نشده است (Wilhelmi & Wilhite, 2002).

در خصوص اثرات خشکسالی در مناطق روستایی تقسیم بندی‌های متفاوتی صورت گرفته است. برخی تأثیرات خشکسالی را به تأثیرات مستقیم و غیر مستقیم و یا تأثیرات اولیه و ثانویه طبقه‌بندی می‌کنند (Kardovani, 2001). تأثیرات مستقیم خشکسالی اغلب مربوط به مشخصه‌های اقلیمی و اکولوژیکی‌اند. در حالی که تأثیرات غیرمستقیم خشکسالی که وسیع‌تر و نامحسوس‌تر هستند، مربوط به آسیب‌های اقتصادی و اجتماعی آن می‌شوند که به علت ماهیت و ویژگی‌های آن به سختی میتوان کمیت‌های آنها را تشخیص داد (Walker & Thers, 1996). از نگاهی دیگر تأثیرات خشکسالی در مناطق روستایی به سه دسته تأثیرات زیست محیطی (مانند کاهش روان آبها، پایین رفتن سطح آبهای زیرزمینی، فرسایش خاک، شوری و کاهش کیفیت آب، کم شدن تنوع گیاهی و جز آن، تأثیرات اقتصادی (همچون افزایش قیمت محصولات کشاورزی و دامی، افزایش تقاضا برای وام‌های کم بهره، افزایش هزینه تأمین آب، کاهش تولیدات غذایی و جز آن) و تأثیرات اجتماعی (مانند کاهش سطح بهداشت و بروز مشکلات سوء تغذیه، افزایش تضادهای سیاسی، اجتماعی و مدیریتی، افزایش درگیری بین کاربران منابع آب، کاهش کیفیت زندگی، فقر، مهاجرت و جز آن) تقسیم شده است (Keshavarz & Karami, 2008).

در خصوص مخاطره محیطی خشکسالی در ایران نیز تحقیقات متعددی به صورت کلان (عام) و به تفکیک مناطق جغرافیایی توسط پرتوی و همکاران (Partovi, Behzadifar & Shirani, 2016)، جان پرور و همکاران (Janparvar, Salehabadi & Zargari, 2017)، آشتاب و شریف زاده (Ashtab & Sharifzadeh, 2017)، افشاری (Afshari, 2014)، پیری و انصاری (Piri & Ansari, 2013) انجام گرفته است و به طور عمده به بررسی وسعت، شدت و دوره‌های خشکسالی از ابعاد فنی پرداخته‌اند. برخی محققان نیز به بررسی تأثیر مخاطرات بر گردشگری پرداخته‌اند.

محمدی یگانه و حکیم‌دوست (Mohammadi Yegane & Hakimdost, 2009)، بر روی تأثیرات اقتصادی خشکسالی متمرکز شدند و به بررسی تأثیر آن بر ناپایداری روستاها در استان زنجان پرداختند. نتایج تحقیق حاکی از آن بود که بین خشکسالی و میزان مهاجرت‌های روستایی با اطمینان ۹۵ درصد رابطه مثبت و معنی‌دار وجود دارد. زمان‌زاده و همکاران (Zamanzadeh, Gadiri, Faraji Sabokbar & Vaeezi, 2017) در تحقیقی، تأثیر مخاطرات بر توسعه گردشگری شهرستان سرعین را بررسی نمودند. آنان با مطالعه نظرات گردشگران داخلی وارد شده به مقصد گردشگری و مسئولین فعال در بخش گردشگری منطقه به بررسی مخاطراتی که بر توسعه گردشگری تأثیر می‌گذارند، پرداخته‌اند. نتیجه مطالعه آنان بیانگر بالا بودن احتمال وقوع مخاطرات بهداشتی و محیطی از دیدگاه گردشگران و همچنین مخاطرات ساختاری-عملکردی از دیدگاه مسئولین فعال در بخش گردشگری بود.

مریانجی و همکاران (Maryanji, Hosseini & Abbasi, 2017)، در پژوهشی به تحلیل و بررسی اثرات خشکسالی بر محصول گندم دیم و مهاجرت روستاییان در استان همدان پرداخته و نتایج نشان داد ۴۰ درصد مهاجرتهای روستایی بین سال‌های ۱۳۸۰-۸۵ بر اثر خشکسالی و پایین بودن عملکرد گندم بوده است. قاسمی (Ghasemi, 2017) در مقاله‌ای با عنوان تأثیر خشکسالی بر روند توسعه گردشگری (مطالعه مورد بررسی وضعیت زاینده رود و دریاچه ارومیه) نتایج حاصل از بررسی تأثیر این مخاطره در مناطقی همچون دریاچه ارومیه و زاینده رود نشان می‌دهد که این مخاطره آثار و پیامدهای منفی بر روند رشد و توسعه گردشگری داشته است اثرات منفی خشکسالی شامل تخریب منابع جنگلی، مرتعی، حیات وحش، اکوسیستم‌های آبی، منابع آب، کشاورزی و سایر منابع طبیعی بوده وگردشگری طبیعی و اکوتوریسم که وابسته به این منابع هستند را تحت تأثیر قرار می‌دهد پیشنهاد می‌شود هرگونه تصمیم‌گیری با توجه شرایط اقلیمی و ظرفیت مناطق انجام گیرد.

سبحانی و اسماعیل زاده (Sobhani & Esmaeilzadeh, 2020) تأثیر اقلیم بر گردشگری در منطقه شکار ممنوع الوند، دادرس مقدم و همکاران (Dadras Moghaddam, Hosseini, Hamidianpour & Sayahi, 2021) تأثیر عوامل اقلیمی را بر صنعت گردشگری در مناطق مختلف ایران، اسدپور کردی (Asadpour Kordi, Amirnejad, Naseri Ojaki & Shirzad Leskokalaye, 2021) کارایی صنعت گردشگری را در اقلیم‌های مختلف بررسی نموده و غلامی و همکاران (Gholami, Gandomkar & Fanaei, 2018) به بررسی تأثیر مخاطرات آب وهوایی بر تعداد گردشگران ایرانی به منظور آینده‌نگری گردشگری شهر اصفهان پرداختند. لذا تحقیقات اندکی در رابطه با مخاطره خشکسالی و اثرات آن بر پایداری مقاصد گردشگری روستایی صورت گرفته است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

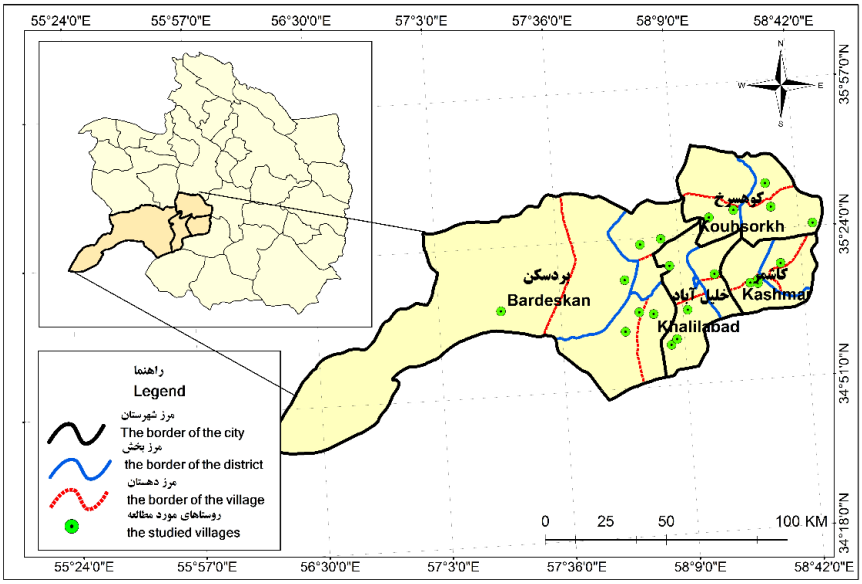
نظافت تکله و همکاران (Nezafat Takaleh, Esfandyari & Shahbazi, 2022) در مطالعه‌ای تحت عنوان بررسی و ارزیابی تأثیرگذاری مخاطرات بر توسعه توریسم (مطالعه موردی: شهرستان مشکین شهر) به این نتیجه رسیدند که احتمال وقوع خطر بهداشتی و محیطی از نظر گردشگران با مقدار ۳/۷۵ بیشترین امتیاز را جهت تهدید توسعه توریسم به خود اختصاص داده است. همچنین احتمال وقوع خطر ساختاری و عملکردی از نظر مسئولین با امتیاز ۳/۲۶ دارای بیشترین تأثیرگذاری بر توسعه توریسم منطقه مورد مطالعه دارد. در نهایت بر اساس نتایج حاصله مجموع امتیازات پاسخگویان بر تأثیرگذاری مخاطرات ذکرشده نشان داد که با مقدار ۲/۸۹ از حد متوسط مخاطره پایین بوده و تأثیرات چندانی بر توسعه توریسم شهرستان مشکین شهر ندارد. بنابراین نتیجه گیری می‌شود با توسعه در بخش‌های احتمالی خطر می‌توان احتمالات خطر در جهت توسعه توریسم را به حداقل رساند تا منجر به توسعه صنعت گردشگری در شهرستان مشکین شهر شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود با توسعه رفاهی، اقتصادی، بهداشتی، زیرساختی و حقوقی در سال‌های آتی منجر به پیشرفت روزافزون صنعت توریسم در سطح شهرستان مشکین شهر شود.

کماسی و همکاران (Komasi, Malekmahmoudi & Montaseri, 2017) تأثیرات خشکسالی بر گردشگری را در سه دسته تأثیرات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی طبقه‌بندی کرده است و بر تعامل و ارتباط بین این پیامدها و تأثیر هم‌افزایی آنها بر یکدیگر تأکید ورزیده است. همچنین کنی (Kenny, 2008) در مطالعه خود بر روی تأثیرات اجتماعی خشکسالی متمرکز شده و به مواردی همچون تنش جسمی و روانی، اضطراب و افسردگی، درگیری‌های خانوادگی، کاهش کیفیت زندگی افراد، افزایش مهاجرت، افزایش فقرعمومی، به عنوان مهم‌ترین پیامدهای اجتماعی خشکسالی اشاره کرده است. همچنین مثیوا و همکاران (Mathivha, Tshipala & Nkuna, 2017) در پژوهشی به بررسی ارتباط بین خشکسالی و ورود گردشگران پرداختند. نتایج نشان داد بین وقوع مخاطره خشکسالی و کاهش ورودی گردشگران ارتباط معکوس وجود دارد بدین ترتیب که ۱۹/۳۶ درصد از سال‌هایی که با خشکسالی وجود داشته تعداد گردشگران کاهش یافته است. براین اساس نتایج به‌دست‌آمده

تأیید می‌کند که صنعت گردشگری یک صنعت شکننده است که متأثر از وضعیت زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی یک منطقه است. بر این اساس با توجه به اثرات منفی و آسیب جدی که مخاطرات محیطی بخصوص خشکسالی می‌تواند به بخش گردشگری وارد نماید و در نتیجه روستاهایی که بخشی از اقتصاد مردم محلی به گردشگری وابسته است، مورد تهدید واقع گردد؛ از این رو پژوهش حاضر به دنبال پاسخگویی به این سوال اساسی است که خشکسالی چه اثراتی بر پایداری مقاصد گردشگری روستایی دارد؟ لذا جهت پاسخگویی به این سوال و همچنین جهت اعمال مدیریت صحیح بایستی منطقه مورد مطالعه از نظر مخاطره خشکسالی مورد بررسی قرار گیرد و سپس اثرات آن بر روی مناطق روستایی مشخص گردد تا بتوان اثرات منفی را با برنامه‌ریزی کنترل نمود. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در امر برنامه‌ریزی برای مدیریت مخاطرات و توسعه گردشگری روستایی در منطقه ترشیز مورد استفاده واقع شود.

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه، منطقه ترشیز واقع در استان خراسان رضوی که در حال حاضر شهرستان‌های کاشمر، کوهسرخ، بردسکن و خلیل‌آباد را در برمی‌گیرد، یکی از مناطق منحصر به فرد واقع در شرق کشور است؛ وجود تنوع آب‌وهوایی و محیط جغرافیایی خاص آن باعث شده است که یکی از قطب‌های گردشگری استان به حساب آید؛ بطوریکه در سال‌های اخیر (قبل از شیوع کرونا) مورد توجه گردشگران داخلی و خارجی قرار گرفته است، و طبق اعلام سازمان میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی استان خراسان رضوی (۱۳۹۹) این منطقه بعد از شهرستان مشهد، در رتبه دوم و در کشور رتبه چهارم را از نظر گردشگری مذهبی ثبت کرده است و مناطق روستایی آن نیز از مقصدهای مهم گردشگران است. اما در کنار این ظرفیت‌ها، توسعه و پایداری گردشگری منطقه می‌تواند مانند دیگر مقاصد گردشگری، توسط مخاطرات بخصوص خشکسالی مورد تهدید قرار گیرد و موجب ناپایداری روستاهای مقصد گردشگری شود. شکل ۱ منطقه موردمطالعه و جاذبه‌های گردشگری روستاهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- محدوده موردمطالعه

Fig.1. Map of the Study Area

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از لحاظ هدف کاربردی و به روش توصیفی- تحلیلی انجام شده است و گردآوری اطلاعات از طریق روش‌های اسنادی و میدانی (پرسشنامه) بهره گرفته شده است. در پژوهش حاضر ابتدا جهت بررسی منطقه از نظر وضعیت خشکسالی از نرم‌افزار DRINC برای محاسبه شاخص SPI استفاده شد. در این پژوهش به دلیل عدم وجود داده‌های کافی در کلیه شهرستان‌های مورد مطالعه، و جهت پهنه‌بندی شاخص SPI از داده‌های بارش ماهانه ۸ ایستگاه سینوپتیک در استان‌های خراسان رضوی، خراسان جنوبی و شهرستان شاهرود در طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ استفاده شد (لازم به ذکر است جهت پهنه‌بندی ضروری است علاوه بر داده‌های ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه از داده‌های ایستگاه سینوپتیک اطراف نیز استفاده گردد در غیر صورت تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی امکان‌پذیر نیست).

بررسی خشکسالی منطقه موردمطالعه با توجه به داده‌های بارش ماهانه که از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد، انجام گردید. برای محاسبه خشکسالی هواشناسی از شاخص (SPI) از بهترین و جامع‌ترین و در عین حال ساده‌ترین روش مطالعه خشکسالی و ترسالی و خصوصیات آن‌ها محسوب می‌شود، استفاده شد. لذا برای محاسبه SPI از نرم‌افزار DRINC استفاده شد. در آخر نقشه‌های پهنه‌بندی مربوطه در دوره‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS 10.6.1 ترسیم شد. همچنین در این پژوهش پس از ارزیابی وضعیت مخاطره خشکسالی در منطقه موردمطالعه، جهت بررسی اثرات خشکسالی بر پایداری روستاهای مقصد گردشگری منطقه ترشیز از پرسشنامه استفاده گردید. بدین جهت پرسشنامه میان ۲۰ نفر از کارشناسان حوزه گردشگری و مخاطرات در شهرستان‌های کاشمر، کوهسرخ، بردسکن و خلیل‌آباد، ۵ نفر از اساتید دانشگاهی و متخصص در زمینه گردشگری و مخاطرات طبیعی و ۵ نفر از دانشجویان دکتری فعال در زمینه گردشگری و مخاطرات طبیعی توزیع شد، لازم به ذکر است انتخاب نمونه‌های تحقیق به روش گلوله برفی انجام شد. سپس برای اولویت‌بندی اثرات خشکسالی بر روستاهای مقصدگردشگری از روش وزن‌دهی MEREC استفاده گردید.

شاخص خشکسالی SPI

این شاخص در سال ۱۹۹۷ توسط ادواردز و مکی (Edwards & McKee, 1997) ارائه شد، این شاخص ساده و قابل استفاده برای تمام شرایط منابع آبی است و بر اساس تفاوت بارش از میانگین برای یک مقیاس زمانی مشخص و سپس تقسیم آن بر انحراف معیار بدست می‌آید (رابطه ۱).

(۱)

$$SPI_{ik} = \frac{R_{ik} - \bar{R}_k}{S_k} \qquad i = 1.2. \dots k = 1.2.3.4.5.6$$

$\bar{R}_k$ و S_k به ترتیب میانگین ارتفاع بارش تجمعی و انحراف معیار ارتفاع بارش تجمعی برای دوره مبنای (k) می‌باشد. جدول ۱ طبقه‌بندی حالت‌های مختلف خشکسالی را به روش SPI نشان می‌دهد.

جدول ۱ – طبقه بندی SPI اداواردز و مک‌کی

Table 1- Edwards and McKee SPI Classification (Edwards & McKee, 1997)

وضعیت خشکسالی Drought situation	محدوده Range
شدیدا مرطوب Very humid	2>
خیلی مرطوب Very wet	1/5-1/99
کمی مرطوب A little wet	1- 1/49
نرمال Normal	0/99- -0/99
خشکسالی ملایم Mild drought	-1 - -1/49
خشکسالی شدید Severe drought	-1/5 - -1/99
خشکسالی بسیار شدید Very severe drought	-2<

نتایج و بحث

در این تحقیق همان‌طور که عنوان شد از بین شاخص‌های خشکسالی، شاخص بارش استاندارد (SPI) انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته است. شاخص SPI، جهت پایش خشکسالی هواشناسی است که اساس آن احتمالات بارندگی برای هر مقیاس زمانی می‌باشد (McKee, Doesken & Kleist, 1993). داده‌های SPI ۱۲ ماه مربوط به ایستگاه‌های مورد مطالعه توسط نرم افزار DRINC محاسبه شد.

جهت محاسبه شاخص SPI مقادیر بارندگی در ایستگاه‌ها و در دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ توسط نرم‌افزار DRINC انجام شد که نتایج آن در جداول ۲ و ۳ و شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است.

طبق مقادیر شاخص SPI اگر مقدار SPI بیشتر از ۲ باشد وضعیت مرطوب و در شرایط ترسالی می‌باشیم و اگر بیشتر از ۲- باشد با خشکسالی خیلی شدید مواجه می‌باشیم. همان‌طور که نتایج حاصل از شاخص SPI در دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ نشان می‌دهد در هیچکدام از ایستگاه‌های موردمطالعه مقدار SPI برابر یا بیشتر از ۲ نمی‌باشد، بلکه در اکثر سال‌ها و ایستگاه‌ها مقادیر SPI منفی است (جدول ۲)، (شکل ۲).

طبق جدول ۲ و شکل ۲ در طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ در ایستگاه طبس مقادیر شاخص SPI در سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۵ بین ۰/۵ تا ۲ بوده است براین اساس در این سال‌ها شاهد وضعیتی بین رطوبت کم تا رطوبت متوسط هستیم. در سایر سال‌ها مقدار SPI منفی بوده؛ لذا در محدوده نرمال و خشکسالی ملایم قرار دارد.

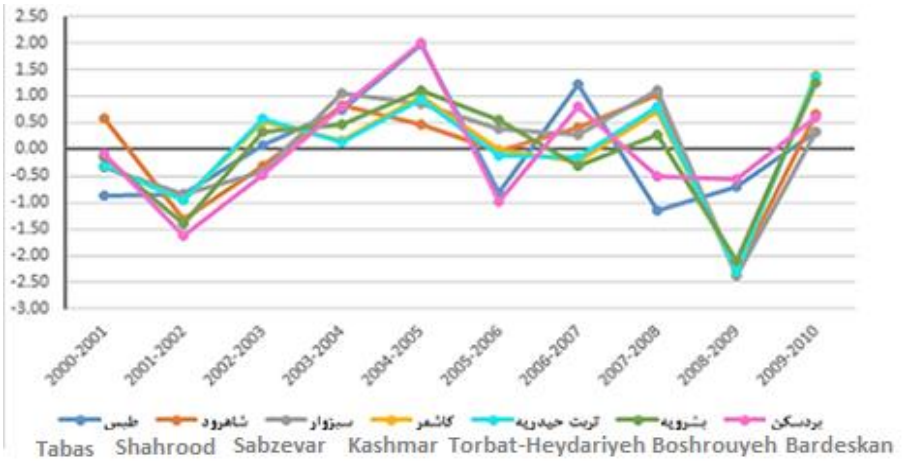
مقادیر شاخص SPI ایستگاه شاهرود در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۳، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۸ منفی بوده و در محدوده نرمال تا خشکسالی ملایم و در سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ در محدوده خشکسالی بسیار شدید قرار داشته است. در سایر سال‌ها در محدوده نرمال بوده است.

در ایستگاه سبزوار، این ایستگاه در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۳ دارای شاخص SPI منفی بوده است؛ بنابراین در محدوده نرمال قرار گرفته و در سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ با خشکسالی بسیار شدید مواجه بوده است. در مابقی سال‌ها در شرایط نرمال قرار داشته است.

جدول ۲- مقادیر شاخص SPI در ایستگاه‌های موردمطالعه طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰

Table 2- SPI indices at the study stations during the 2000-2010 period (National Meteorological Organization, 2024)

ایستگاه های سینوپتیک Synoptic stations	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010
طبس Tabas	-0/865	-0/833	0/068	0/750	1/976	0/808	1/218	-1/160	-0/698	0/388
شاهرود Shahrood	0/573	-1/317	-0/307	0/836	0/455	0/024	0/412	1/040	-2/294	0/655
سبزوار Sabzevar	-0/340	-0/841	-0/428	1/049	0/872	0/396	0/265	1/104	-2/365	0/328
کاشمر Kashmar	-0/307	-0/944	0/521	0/170	1/005	-0/012	-0/217	0/718	-2/288	1/383
بردسکن Bardeskan	-0/312	-0/944	0/586	0/145	0/944	-0/108	-0/154	0/794	-2/271	1/367
تربت حیدریه Torbat-Heydariyeh	-0/139	-1/397	0/336	0/462	1/117	0/550	-0/325	0/283	-2/103	1/247
بشرویه Boshrouyeh	-0/102	-1/619	0/471	0/797	1/991	0/968	0/812	-0/512	-0/553	0/615



شکل ۲- مقادیر SPI در ایستگاه‌های موردمطالعه دوره ده ساله ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰

Fig.2. SPI values at study stations (2000-2010)

نتایج حاصل از جدول ۲ نشان می‌دهد، ایستگاه کاشمر در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲، ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ در شرایط نرمال و در سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ با خشکسالی بسیار شدید مواجه بوده است در سایر سال‌ها در محدوده کمی مرطوب تا نرمال قرار داشته است. طبق نتایج جدول ۲ ایستگاه بردسکن در سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ دچار خشکسالی بسیار شدید بوده و در سایر سال‌ها در محدوده کمی مرطوب تا خشکسالی ملایم قرار داشته است.

نتایج در ایستگاه تربت حیدریه نشان می‌دهد فقط در سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ در محدوده خشکسالی شدید بوده، در سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۵ و ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ در شرایط کمی مرطوب بوده و در سایر سال‌ها در محدوده نرمال تا خشکسالی شدید واقع شده است. همانطور که شکل۳ نشان می‌دهد ایستگاه بشرویه در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵، ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ در محدوده نرمال تا کمی مرطوب قرار داشته، در سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۲ با خشکسالی شدید مواجه بوده و در سایر سال‌ها در محدوده نرمال قرار داشته است.

طبق نتایج حاصل از شاخص SPI در دوره ده ساله ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ و براساس تقسیمات شاخص استاندارد بارش، زمانی خشکسالی رخ می‌دهد که SPI کمتر از ۰.۹۹- باشد، بنابراین مقدار شاخص SPI در تمامی ایستگاه‌ها در سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ منفی بوده و همه ایستگاه‌ها به جز ایستگاه‌های طبس و بشرویه دارای SPI بیشتر از ۲- بوده که نشان از خشکسالی بسیار شدید در محدوده موردمطالعه است.

همچنین با توجه به اینکه زمانی خشکسالی رخ می‌دهد که شاخص بارش استاندارد شده دارای توالی‌های منفی باشد؛ و زمانی که مقادیر SPI برابر ۱- و یا کمتر شود؛ خشکسالی تشدید می‌شود. با مثبت شدن شاخص بارش استاندارد شده دورهٔ خشکسالی خاتمه می‌یابد (Mirakbari, Mortezaei & Mohseni, 2018). بنابراین یافته‌ها نشان می‌دهد در دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ محدوده موردمطالعه فقط در سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ در شرایط کمی مرطوب واقع بوده و در سایر سال‌ها (۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹) با خشکسالی ملایم مواجه است و ادامه روند خشکسالی می‌تواند تأثیرات جبران‌ناپذیری بر روستاهای مقصد گردشگری منطقه ترشیز برجای گذارد.

در ادامه جهت ارزیابی بهتر وضعیت خشکسالی و دستیابی به نتیجه‌ای دقیق‌تر، شاخص SPI برای دو دوره آماری ده ساله ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۱ و ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ محاسبه گردید. نتایج حاصل از شاخص SPI در دوره ده ساله ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ در جدول ۳ و شکل ۳ آمده است.

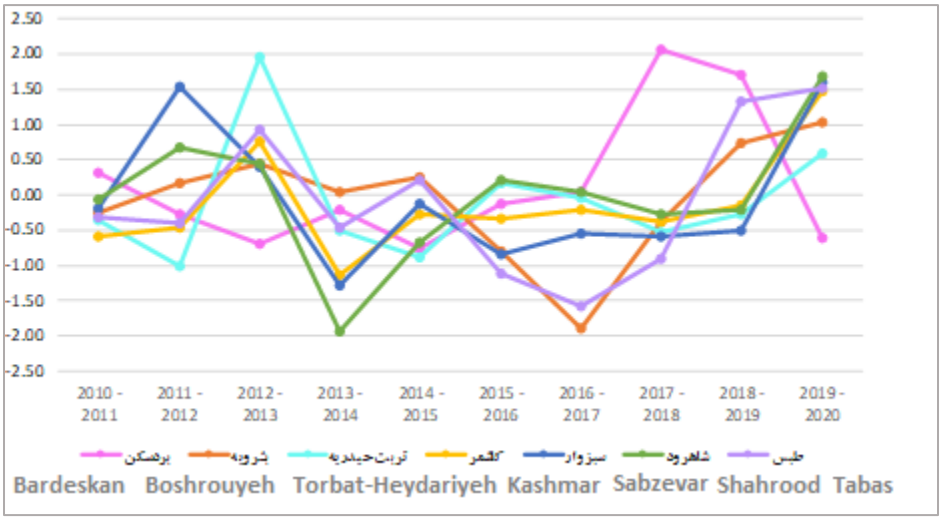
طبق شکل ۳ که مقادیر SPI را در ایستگاه‌های موردمطالعه نشان می‌دهد. با نگاه کلی به نمودار مذکور می‌توان گفت شدیدترین خشکسالی‌ها در این ایستگاه‌ها مربوط به سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ و ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۷ می‌باشد. روند تغییرات شاخص SPI نشان می‌دهد در ایستگاه طبس مقادیر شاخص SPI در سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ بین ۱ تا ۱/۵ بوده است براین اساس در این سال‌ها شاهد وضعیت کمی مرطوب هستیم. در سایر سال‌ها مقدار SPI منفی بوده؛ لذا در محدوده نرمال و خشکسالی ملایم قرار دارد. ایستگاه شاهرود در سال ۲۰۲۰- ۲۰۱۹ در محدوده کمی مرطوب، در سال‌های ۲۰۱۲-۲۰۱۱، ۲۰۱۳-۲۰۱۴ و ۲۰۱۷- ۲۰۱۶ در محدوده نرمال و در سایر سال‌ها در محدوده خشکسالی ملایم قرار دارد.

ایستگاه سبزوار در سال‌های ۲۰۲۰- ۲۰۱۹ و ۲۰۱۲- ۲۰۱۱ در محدوده کمی مرطوب، در سال ۲۰۱۴-۲۰۱۳ در محدوده خشکسالی ملایم و در سایر سال‌ها در محدوده نرمال قرار داشته است (شکل ۲).

جدول ۳- مقادیر شاخص SPI در ایستگاه‌های موردمطالعه طی دوره آماری ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰

Table 3- SPI values at study stations (2010-2020)
(National Meteorological Organization, 2024**)**

ایستگاه های سینوپتیک Synoptic stations	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020
طبس Tabas	-0/32	-0/39	0/92	-0/45	0/22	-1/10	-1/58	-0/90	1/34	1/51
شاهرود Shahrood	-0/06	0/69	0/44	-1/94	-0/68	0/22	0/04	-0/26	-0/20	1/69
سبزوار Sabzevar	-0/18	1/53	0/40	-1/28	-0/13	-0/84	-0/55	-0/59	-0/49	1/59
کاشمر Kashmar	-0/58	-0/46	0/75	-1/14	-0/27	-0/34	-0/20	-0/38	-0/14	1/48
بردسکن Bardeskan	-0/32	-0/27	-0/69	-0/21	-0/75	-0/13	0/04	2/05	1/71	-0/60
تربت حیدریه Torbat-Heydariyeh	-0/36	-1	1/96	-0/49	-0/88	0/18	-0/04	-0/51	-0/27	0/58
بشرویه Boshrouyeh	-0/25	0/16	0/45	0/04	0/25	-0/80	-1/89	-0/37	0/73	1/03



شکل ۳- مقادیر SPI در ایستگاه‌های موردمطالعه دوره ده ساله ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰

Fig.3. Spatial variability of SPI among study stations (2010-2020)

طبق نتایج شکل ۳ ایستگاه کاشمر در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۹ و ۲۰۱۳-۲۰۱۲ در محدوده نرمال و در سایر سال‌ها خشکسالی خفیفی را سپری کرده است. در ایستگاه بردسکن نتایج نشان می‌دهد در سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ سال‌های نسبتا مرطوبی داشته و در سایر سال‌ها دچار خشکسالی خفیفی بوده است.

ایستگاه تربت حیدریه در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲ و ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹ خشکسالی خفیفی را تجربه کرده است و در سایر سال‌ها در محدوده نرمال و کمی مرطوب قرار داشته است.

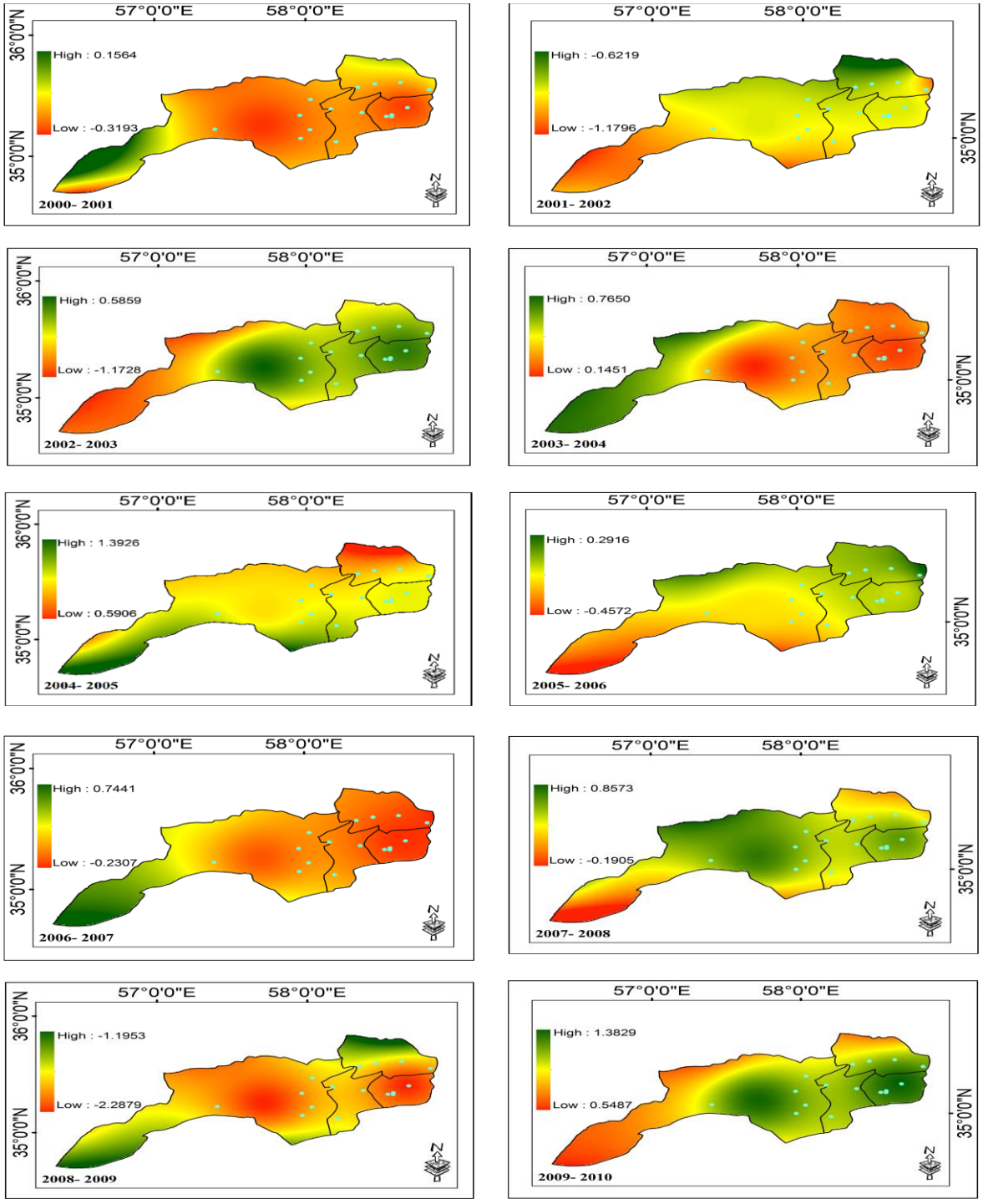
همانطور که شکل ۳ نشان می‌دهد ایستگاه بشرویه در سال ۲۰۲۰- ۲۰۱۹ در محدوده کمی مرطوب، در سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵ و ۲۰۱۹-۲۰۱۸ در محدوده نرمال و در سایر سال‌ها در محدوده خشکسالی ملایم و در سال ۲۰۱۶-۲۰۱۷ خشکسالی شدیدی را تجربه کرده است.

بنابراین در نهایت نتایج حاصل از شاخص SPI در سال‌های مورد بررسی نشان می‌دهد و براساس تقسیمات شاخص استاندارد بارش، زمانی خشکسالی رخ می‌دهد که SPI کمتر از ۰.۹۹- باشد، بنابراین نتایج نشان می‌دهد در اکثر سال‌ها و ایستگاه‌های موردمطالعه مقدار شاخص SPI منفی بوده است و با توجه به اینکه زمانی خشکسالی رخ می‌دهد که شاخص بارش استاندارد شده دارای توالی‌های منفی باشد؛ بنابراین یافته‌ها نشان می‌دهد که محدوده مورد مطالعه با خشکسالی ملایم مواجه است.

روش درون یابی IDW

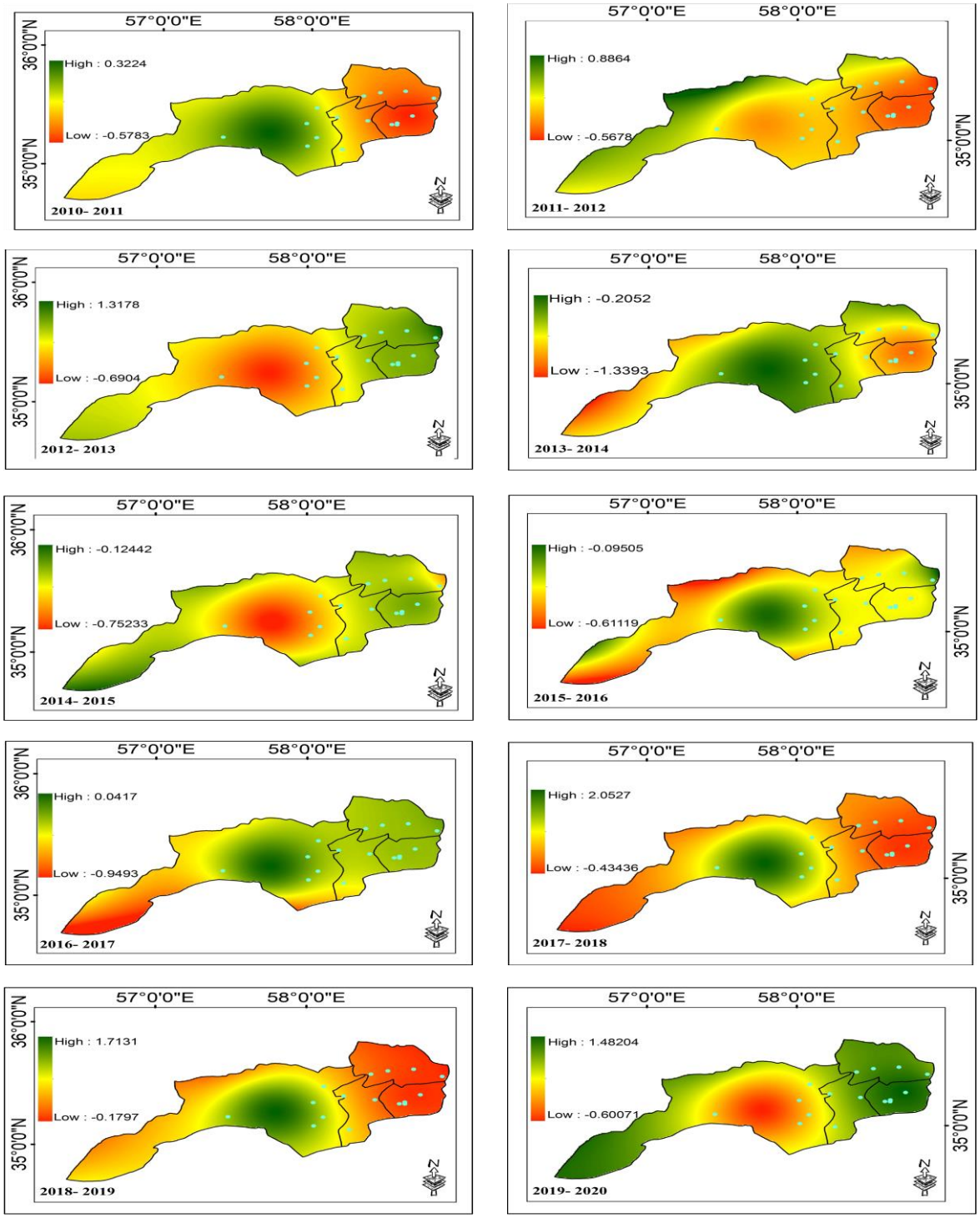
جهت فضایی نمودن مقادیر شاخص SPI، در هر ایستگاه مقدار SPI در نرم افزار GIS با استفاده از روش درون‌یابیIDW پهنه‌بندی گردید. مدل IDW یکی از معمول‌ترین روش‌های میانیابی نقاط پراکنده در فضاست که اساس آن بر مبنای این فرضیه است که در یک سطح میانیابی، اثر یک پارامتر بر نقاط اطرافش یکسان نیست و هر چه فاصله از مبدأ افزایش یابد، اثر کمتر خواهد شد. این روش، روشی تأیید شده برای تبدیل اطلاعات نقطه‌ای به منطقه‌ای در مقیاس سالانه می‌باشد (Janizadeh, Nohegar, Avand & Dolat Kordestani, 2020). شکل‌های ۴ و ۵ پهنه‌بندی شاخص SPI در منطقه موردمطالعه را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از پهنه‌بندی مقادیر شاخص SPI منطقه موردمطالعه (شکل‌های ۴، ۵، ۶ و ۷) و شکل‌های ۶ و ۷ گویای آن است که منطقه موردمطالعه در خلال سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ خشکسالی‌های خفیف تا شدید را سپری کرده است. خشکسالی‌های شدید به سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۳، ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹، ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ و ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۷ اختصاص دارد. به طور کلی مقادیر شاخص SPI نشان می‌دهد، در اکثر ایستگاه‌های واقع در محدوده موردمطالعه و در اکثر سال‌ها مقادیر SPI کمتر از ۰/۹۹ و منفی بوده است و منطقه دچار خشکسالی خفیفی بوده است.



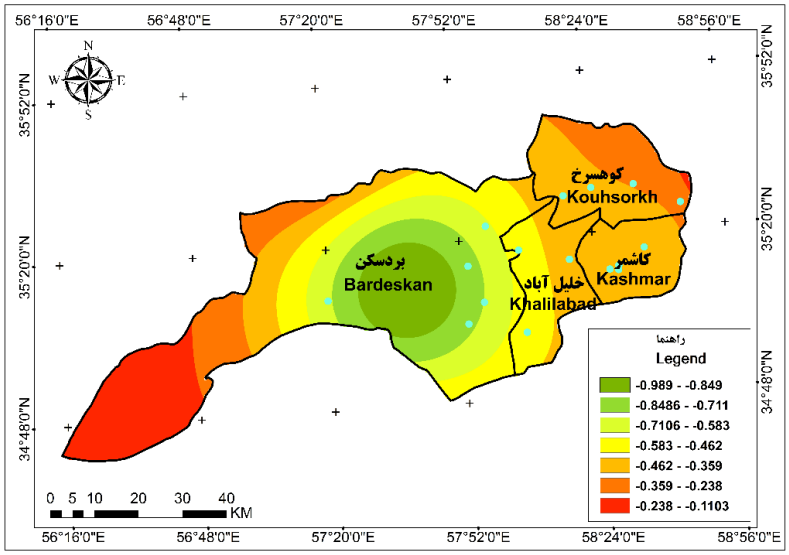
شکل ۴ – پهنه‌بندی مقادیر SPI منطقه موردمطالعه (دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰)

Fig.4. Spatial distribution of SPI values in the study area, 2000-2010



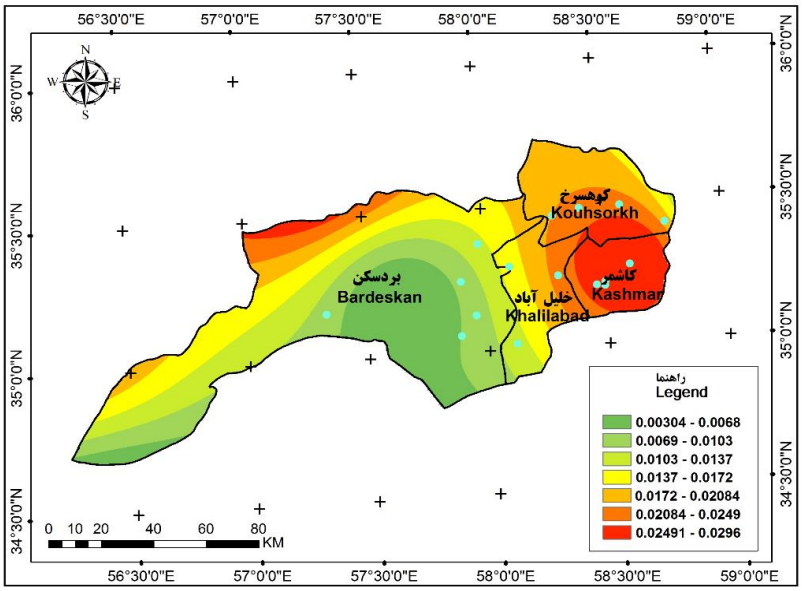
شکل ۵ – پهنه‌بندی مقادیر SPI منطقه موردمطالعه (دوره آماری ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰)

Fig.5. Spatial distribution of SPI values in the study area (2010-2020)



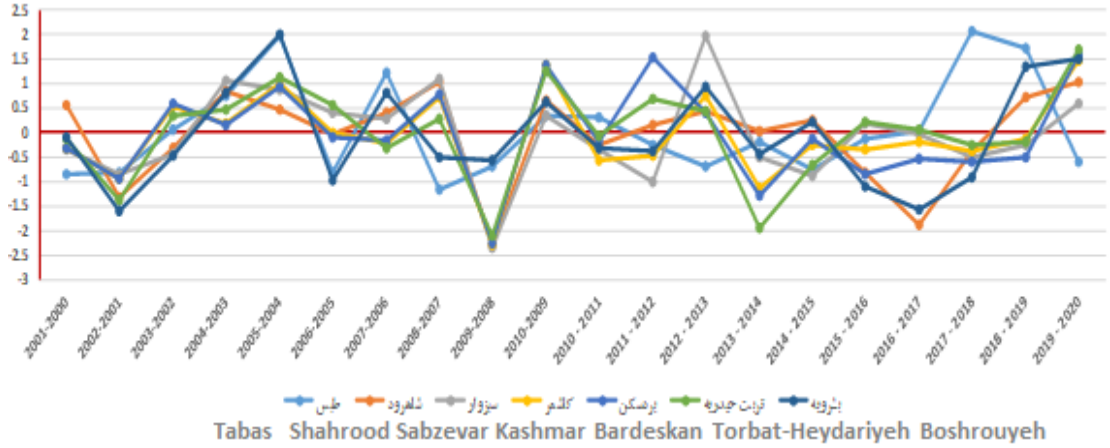
شکل ۶- پهنه‌بندی مقادیر SPI منطقه موردمطالعه (دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰)

Fig.6. Spatial distribution of SPI values in the study area (2000-2010)



شکل ۷ – پهنه‌بندی مقادیر SPI منطقه موردمطالعه (دوره آماری ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰)

Fig.7. Spatial distribution of SPI values in the study area (2010-2020)



شکل ۸- مقادیر شاخص SPI منطقه موردمطالعه در دوره آماری ۲۰ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰)

Fig.8. Index SPI values in the study area over a 20-year period (2000-2020)

در ادامه با توجه به هدف تحقیق حاضر که بررسی تحلیل و اثرات مخاطره خشکسالی بر پایداری روستاهای مقصد گردشگری منطقه ترشیز می‌باشد؛ لذا بعد از اینکه وضعیت منطقه از نظر مخاطره خشکسالی مورد بررسی قرار گرفت و به این نتیجه دست یافتیم که منطقه مورد مطالعه با مخاطره خشکسالی مواجه هست؛ بنابراین برای بررسی میزان اثرات این مخاطره بر گردشگری روستاهای مقصد گردشگری، پرسشنامه‌ای در اختیار ۳۰ نفر از کارشناسان و اساتید فعال و دانشجویان دکتری در زمینه حوزه گردشگری و مخاطرات گذاشته شد و سپس برای اولویت‌بندی میزان اثرات خشکسالی بر پایداری روستاهای گردشگری منطقه مورد مطالعه از روش وزن‌دهی MEREC استفاده شد. این روش یکی از روش‌های وزن‌دهی جدید معیارها و زیرمعیارها می‌باشد.

نتایج نهایی حاصل از این مدل نشان می‌دهد از بین اثرات فردی- اجتماعی، اقتصادی، کالبدی- زیرساختی و محیطی، رتبه اول و دوم به ترتیب به اثرات اقتصادی و محیطی اختصاص دارد. به عبارتی مخاطره خشکسالی بیشترین تأثیر را بر اقتصاد و سپس محیط‌زیست روستاهای منطقه مورد مطالعه می‌گذارد و بدین ترتیب موجب ناپایداری مقاصد گردشگری روستایی می‌گردد. همچنین با توجه به بررسی مؤلفه‌ها، در مجموع می‌توان گفت که مخاطره خشکسالی بیشترین تأثیر را به ترتیب مؤلفه‌های کاهش فرصت‌های اشتغال در بخش گردشگری، کاهش سطح تولیدات کشاورزی و باغی، ورشکستگی فعالیت‌های کارآفرینانه روستاییان، تخریب مزارع و باغات روستا و کاهش درآمد شاغلان (مستقیم و غیرمستقیم) در بخش گردشگری بر جای می‌گذارد.

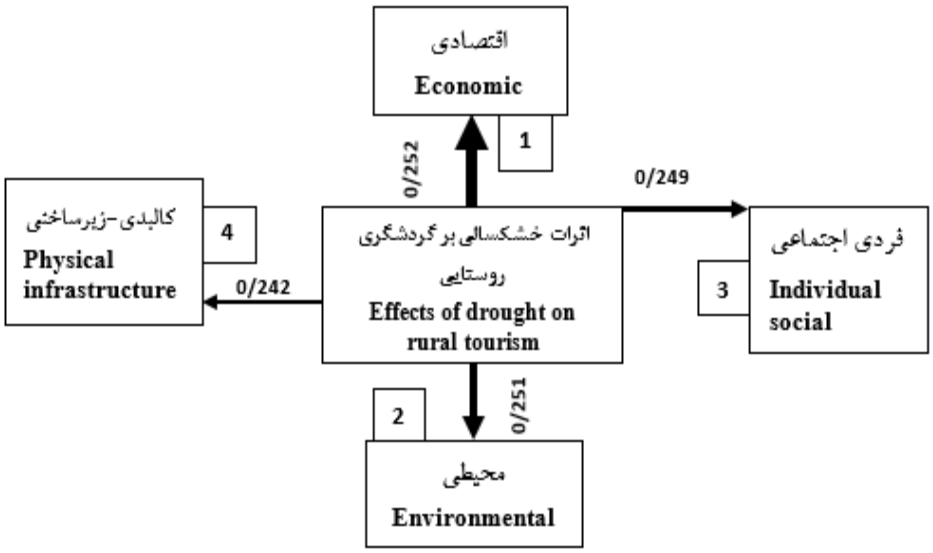
جدول ۴– نتایج اولویت‌بندی اثرات مخاطره خشکسالی بر پایداری روستاهای مقصد گردشگری منطقه ترشیز

Table 4- Results of ranking the effects of drought hazard on the sustainability of tourist villages in the Torshiz region

رتبه Rank	وزن نرمال شده Normalized weight	وزن اثرات Effects weight	شاخص Indicator	ابعاد Dimensions
38	0/0113	0/2399	مهاجرت اجباری اهالی و تخلیه روستاهای مقصد گردشگری Forced migration of residents and evacuation of tourist destination villages	فردی اجتماعی Individual social
20	0/0228		رواج بیماری ها و کاهش گردشگران Spread of diseases and decrease of tourists	
12	0/0305		افزایش بروز نزاع و درگیری (بخصوص برای دسترسی به منابع آب) Increasing incidence of conflicts (especially for access to water sources)	
19	0/023		کاهش میزان وحدت و همکاری میان روستاییان Reducing the level of unity and cooperation among villagers	
23	0/0198		ایجاد احساس یاس و ناامیدی از فعالیت‌های گردشگری و کشاورزی روستا Creating a feeling of hopelessness and despair from the tourism and agricultural activities of the village	
16	0/0247		افزایش اضطراب و افسردگی برای راه اندازی کسب و کارهای گردشگری Increasing anxiety and depression to start tourism businesses	
29	0/0174		افزایش فقر عمومی Increase in general poverty	
26	0/0174		کاهش کیفیت زندگی روستاییان Decreasing the quality of life of villagers	
43	0/0058		کاهش قیمت اراضی زراعی و باغ ها Reducing the price of agricultural land and gardens	
2	0/046		کاهش سطح تولیدات کشاورزی و باغی Reducing the level of agricultural and horticultural production	
13	0/0304		افزایش قیمت موادغذایی Increase in food prices	
40	0/0061		افزایش هزینه‌های زندگی Increase in the cost of living	
1	0/0569	0/2517	کاهش فرصت‌های اشتغال در بخش گردشگری Reduction of employment opportunities in the tourism sector	اقتصادی Economic
36	0/0116		کاهش اشتغال زنان در مشاغل گردشگری Reducing the employment of women in tourism jobs	
33	0/012		کاهش تنوع فعالیتهای اقتصادی Reducing the diversity of economic activities	
9	0/0369		کاهش قیمت زمین در روستا Reduction of land prices in the village	
41	0/005		کاهش رونق صنایع دستی و محلی Decrease in the prosperity of handicrafts and local crafts	
17	0/0243		کاهش سرمایه‌گذاری در کسب و کارهای گردشگری Reducing investment in tourism businesses	

3	0/0413		ورشکستگی فعالیت‌های کارافرینانه روستاییان Bankruptcy of entrepreneurial activities of villagers	کالبدی زیرساختی Physical infrastructure
30	0/017		کاهش حمایت‌های بخش خصوصی و دولتی از کسب و کارهای گردشگری Reducing the support of the private and government sectors for tourism businesses	
15	0/0248		کاهش توجه دولت به برنامه‌ریزی و سرمایه گذاری در بخش گردشگری Reducing the government's attention to planning and investing in the tourism sector	
18	0/024		کاهش انگیزه بخش خصوصی به سرمایه گذاری در این مناطق Reducing the motivation of the private sector to invest in these areas	
5	0/04		کاهش درامد شاغلان (مستقیم و غیرمستقیم) در بخش گردشگری Reducing the income of employees (direct and indirect) in the tourism sector	
8	0/0377		کاهش فعالیت‌ها و مکان‌های ارائه دهنده خدمات گردشگری Reducing activities and places providing tourism services	
37	0/0113		کاهش حمایت از سرمایه‌گذاران کوچک محلی Reducing support for small local investors	
10	0/0343		کاهش تولیدات محلی (زراعی، دامی، باغی) Reduction of local production (agricultural, livestock, horticultural)	
14	0/0299		کاهش امکانات رفاهی اقامتی گردشگری Reduction of tourism accommodation amenities	
24	0/0198		کاهش امکانات بهداشتی درمانی Reduction of healthcare facilities	
39	0/0078		کاهش سرمایه‌گذاری در زمینه تأسیسات زیربنایی Reducing investment in infrastructure facilities	
11	0/0318	0/2419	از بین رفتن بافت سنتی روستا The loss of the traditional texture of the village	
27	0/0174		کاهش آب اشامیدنی Reduction of drinking water	
31	0/0169		از بین رفتن زیرساخت‌ها به دلیل خالی شدن روستا Destruction of infrastructure due to the emptying of the village	
22	0/0216		کاهش حفاظت از منابع و میراث طبیعی روستا Reducing the protection of natural resources and heritage of the village	محیطی Environmental
34	0/012		کاهش پوشش گیاهی در روستا Reduction of vegetation in the village	
7	0/0385	0/2505	تخریب و فرسایش خاک Soil destruction and erosion	
42	0/002		افزایش گرد و غبار در روستا Increasing dust in the village	
4	0/0406		تخریب مزارع و باغات روستا Destruction of village farms and gardens	
35	0/0119		کاهش پوشش گیاهی مراتع Reduction of grassland vegetation	

25	0/0183	کاهش آب‌های سطحی Reduction of surface water
21	0/0225	غیرمتعادل شدن دما در فصول گرم و سرد Temperature imbalance in hot and cold seasons
6	0/0397	کاهش تنوع گونه‌های گیاهی Reducing the diversity of plant species
28	0/0174	مهاجرت گونه‌های جانوری Migration of animal species
32	0/014	از بین رفتن چشم‌اندازهای طبیعی روستا (خشک شدن چشمه، رودخانه و..) Destruction of the natural landscapes of the village (drying of springs, rivers, etc.)



شکل ۹- اولویت‌بندی اثرات خشکسالی بر پایداری روستاهای مقصد گردشگری

Fig.9. Prioritization of drought impacts on the sustainability of tourism destination villages

نتیجه‌گیری

پایداری صنعت گردشگری مانند هر صنعت دیگر از مخاطرات تأثیر می‌پذیرد یکی از مخاطراتی که به دلیل اقلیم خشک و نیمه خشک کشور ایران با آن روبرو هستیم، مخاطره خشکسالی می‌باشد. روستاهای مقصد گردشگری به دلیل نزدیکی بیشتر با طبیعت و اقتصاد مبتنی بر کشاورزی، در مواجهه با مخاطرات به ویژه مخاطره خشکسالی آسیب‌پذیرتر هستند؛ لذا خشکسالی می‌تواند تأثیر منفی بر گردشگری روستایی به عنوان یکی از مهم‌ترین صنایع دارای پتانسیل‌های لازم برای کمک به توسعه فعالیت‌های اقتصادی جوامع محلی، برجای گذارد. روستاهای مقصد گردشگری منطقه موردمطالعه نیز از این قاعده مستثنی نیست. براین اساس جهت دستیابی به هدف پژوهش حاضر که بررسی اثرات مخاطره خشکسالی بر پایداری روستاهای مقصد گردشگری منطقه ترشیز است، نخست وضعیت منطقه از نظر خشکسالی مورد ارزیابی قرار گرفت.

خشکسالی منطقه با استفاده از داده‌های بارندگی ایستگاه‌های مورد نظر در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ که از مرکز هواشناسی کشور اخذ شد؛ با استفاده از شاخص SPI توسط نرم افزار DRINC سنجش شد. سپس با استفاده از نرم افزار GIS و روش IDW منطقه موردتحقیق از نظر خشکسالی پهنه‌بندی گردید. با توجه به منفی بودن روند شاخص SPI در ایستگاه‌های موردمطالعه نتایج نشان می‌دهد منطقه مورد نظر در محدوده خشکسالی قرار گرفته است.

در ادامه اثرات خشکسالی بر روستاهای مقصد گردشگری منطقه ترشیز مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب اثرات خشکسالی بر پایداری روستاهای گردشگری توسط ۴ عامل اثرگذار (اقتصادی، فردی اجتماعی، کالبدی زیرساختی و محیطی) و ۴۳ مولفه مطالعه شده است. جهت بررسی میزان اثرگذاری (یا اولویت بندی) هر یک از عوامل و مؤلفه‌ها از روش اولویت‌بندی MEREC استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد از میان ۴ بعد مذکور، خشکسالی بیشترین تأثیر را در بعد اقتصادی و سپس بعد محیطی گردشگری روستایی خواهد داشت. این عوامل در بلندمدت بر فعالیت‌های گردشگری روستایی که مرتبط با سرمایه‌های جغرافیایی و کیفیت مناظر طبیعی روستاهاست اثر می‌گذارد. همچنین طبق نتایج، اولویت‌بندی مؤلفه‌ها نشان داد بیشترین تأثیر خشکسالی بر فرصت‌های اشتغال بخش گردشگری می‌باشد. همچنین خشکسالی سبب می‌شود سطح تولیدات کشاورزی و باغی کاهش یابد، پوشش گیاهی محیط روستا از بین رفته و مزارع و باغات روستاها که می‌تواند زمینه گردشگری کشاورزی را فراهم کند مورد تهدید واقع شوند و به طور کلی چشم‌انداز روستا از بین می‌رود و بالطبع آن گردشگران روز به روز کاهش می‌یابند و با کاهش گردشگر فعالیت‌های کارآفرینانه روستاییان با ورشکستگی مواجه خواهد شد و به بیان دیگر می‌توان گفت تمامی فعالیت‌های گردشگری تعطیل خواهند شد و به طور کلی به دنبال تمامی این پیامدها به دلیل کاهش گردشگر و کاهش درآمد حاصل از گردشگری، اقتصاد روستاها متزلزل خواهد گشت.

بنابراین خشکسالی می‌تواند موجب کاهش منابع آبی، تخریب محیط‌زیست منطقه، کاهش سطح زیرکشت و تولید محصولات کشاورزی، تخریب باغات و مراتع، از بین رفتن چشم‌انداز روستا، فشار بر منابع طبیعی، کاهش درآمد حاصل از گردشگری و در نهایت مهاجرت گسترده روستاییان و خالی شدن روستاها گردد؛ بنابراین تمامی این اثرات منفی منجر به ناپایداری گردشگری در روستاهای مقصد گردشگری می‌گردد. در این راستا با توجه به اینکه گردشگری نقش موثری در روستاهای مقصد گردشگری دارد بر این اساس ضروری است جهت مدیریت مخاطرات اقداماتی اساسی از سوی مدیران و برنامه‌ریزان صورت گیرد تا تبعات منفی ناشی از آن به حداقل رسیده و پایداری روستاهای مقصد گردشگری تثبیت گردد.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر حامی مالی نداشته است.

سپاسگزاری

مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول در رشته جغرافیا و برنامه ریزی روستایی دانشگاه فردوسی مشهد است. بدینوسیله از اساتید محترم سرکار خانم دکتر بوزرجمهری، دکتر فرجی سبکبار و دکتر سجاسی به خاطر بازبینی متن مقاله و ارائه نظرهای ساختاری تشکر و قدردانی می شود.

References

Afshari, A. (2014). *Socioeconomic Impacts of the International MENARID Project on Desert Desertification Indicators (Case Study: Hamoun City, Sistan)*. Master's Thesis. Zabol University, Faculty of Water and Soil, Range and Watershed Management Group. [In Persian]

Anabastani, A. A., Einali, J., & Romyani, A. (2018). Factors affecting tourists' satisfaction with rural tourism spaces in Kharkan region, Buin Zahra County. *Journal of Spatial Economics and Rural Development*, *6*(20), 155-172. [In Persian] http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.serd.6.20.155

Anabestani, A., Jafari, F., & Ataei, P. (2024). Female Entrepreneurs and Creating Small Rural Businesses in Iran. *Journal of the Knowledge Economy*, *15*, 8682-8705. https://doi.org/10.1007/s13132-023-01216-w

Asadpour Kordi, M., Amirnejad, H., Naseri Ojaki, S. H., & Shirzad Leskokalaye, S. (2021). The Performance of Iran's Tourism Industry and Its Analysis in Different Climates. *Tourism Social Studies Quarterly*, *9*(18), 1-28. [In Persian] https://doi.org/10.52547/journalitor.36157.9.18.0

Ashtab, A., & Sharifzadeh, M. (2017). Vulnerability of Farmers' Livelihoods to Drought: A Case Study of Hirmand County. *Iranian Journal of Agricultural Extension and Education*, *13*(1), 75-88. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20081758.1396.13.1.6.4

Bapiri, J. (2012). *Key Concepts in Tourism Studies*. Tehran: Mehkameh Publications. [In Persian]

Chin, C. H., Lo, M. C., Songan, P., & Nair, V. (2014). Rural tourism destination competitiveness: a study on Annah Rais Longhouse Homestay, Sarawak. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *144*, 35-44. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.07.271

Dadras Moghaddam, A., Hosseini, S. M., Hamidianpour, M., & Sayahi, M. (2021). The Impact of Climatic and Economic Factors on the Tourism Industry in Different Regions of Iran (Using Dynamic Ordinary Least Squares and Generalized Method of Moments during 2008-2019). *Journal of Natural Environment and Iran's Natural Resources*, *47*(1), 41-54. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jne.2021.313379.2114

Dewi, Y. K. L. (2014). Modeling the relationships between tourism sustainable factor in the traditional village of pancasari. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 135, 57-63. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.07.325

Edwards, D. C., & McKee, T. B. (1997). *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales*. Climatology Report 97-2, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins.

Ghasemi, M. (2017). The impact of drought on tourism development: A case study of Zayandeh Rud River and Urmia Lake. Paper presented at the Proceedings of the 1st Conference on New Ideas and Technologies in Geographical Sciences. [In Persian]

Gholami, S., Gandomkar, A., & Fanaei, R. (2018). The impact of climatic hazards on the number of foreign tourists in Isfahan. *Tourism and Development Planning*, *7*(26), 146-168. [In Persian] https://doi.org.10.22080/jtpd.2018.2045

Jafari, F., Shayan, H., & Bataghva Sarabi, H. (2020). Analysis of Key Factors Affecting the Promotion of Resilience of Rural Settlements against Environmental Hazards (Case Study: Rural Settlements of Fariman City), Journal of Geography and Environmental Hazards, *9*(1), 85-115. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geo.v9i1.86846

Janizadeh, S., Nohegar, Á., Avand, M., & Dolat Kordestani, M. (2020). Evaluating the Capability of Various Types of Geomorphological facies in supplying dust sources in the west of Khozestan province- Iran. *Researches in Earth Sciences, 11*(2), 35-50. [In Persian] https://doi.org/10.52547/esrj.11.2.35

Janparvar, M., Saleh Abadi, R., & Zargari, M. (2017). Consequences of Short-Term Drought-Induced Migration Crisis in Sistan and Baluchestan Province. *Journal of the Geographical Society of Iran*, *15*(52), 183-199. [In Persian] http://rahbord-mag.ir/fa/Article/8947/FullText

Kardovani, P. (2001). *The Great Central Desert of Iran and Adjacent Regions*. Tehran: Tehran University Press. [In Persian]

Kenny, A. (2008). Assessment of the Social Impacts of Drought. *Journal of American Water Resources Association*, *37*(3), 678-686. https://www.agriculture.gov.au/sites

Keshavarz, M., & Karami, E. (2008). Factors influencing drought management and impacts: A structural equation modeling approach. *Journal of Crop Production and Processing*, *12*(43), 267-283. [In Persian] http://dorl.net/dor/20.1001.1.22518517.1387.12.43.23.1

Komasi, M., Malekmahmoudi, M., & Montaseri, H. (2017). Drought forecasting by SPI and EDI indices using ANFIS method based on C-mean and SC clustering (Case study: Kohgiluyeh and Boyer Ahmad Province). *Journal of Agricultural Meteorology*, *5*(1), 36-47. [In Persian] https://doi.org/10.22125/AGMJ.2017.54982

Li, H., Goh, C., Hung, K., & Chen, J. L. (2018). Relative Climate Index and Its Effect on Seasonal Tourism Demand, *Journal of Travel Research*, *57*(2), 178-192. https://doi.org/10.1177/0047287516687409

Maryanji, Z., Hosseini, S. A., & Abbasi, H. (2017). Analysis of the effects of drought on wheat production and rural migration in Hamadan Province. *Quarterly Journal of Spatial Economy and Rural Development*, *6*(19), 95-112. [In Persian] https://doi.org/10.18869/acadpub.serd.6.19.95

Mathivha, F., Tshipala, N., & Nkuna, Z. (2017). The relationship between drought and tourist arrivals: A case study of Kruger National Park, South Africa. *Jàmbá: Journal of Disaster Risk Studies*, *9*(1), 1-8. https://doi.org/10.4102/jamba.v9i1.471

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17, 22, 179-183.

Miller, D. S. (2021). Abrupt new realities amid the disaster landscape as one crisis gives way to crises. *Worldwide Hospitality and Tourism Themes*, *13*(3), 304-311. https://doi.org/10.1108/WHATT-02-2021-0037

Mirakbari, M., Mortezaii, G., & Mohseni, M. (2018). Investigation Of Effect Meteorological Drought On Surface And Ground Water Resources By Indices SPI, SPEI, SDI and GRI. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, *12*(42), 70-80. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089554.1397.12.42.8.9

Mohammadi Yegane, B., & Hakimdost, Y. (2009). Economic impacts of drought and its effects on rural instability: A case study of Qareh Poshtlouye Bala. Paper presented at the Proceedings of the Regional Conference on Water Crisis and Drought, Azad University of Rasht. [In Persian] https://civilica.com/doc/64528

Mohammadi, M., & Mirtaghian Rudsari, S. M. (2016). Strategic entrepreneurship in rural tourism destinations (Case study: Jant Rudbar Rural District, Ramsar). *Geography*, *14*(49), 249-276. [In Persian]

National Meteorological Organization. (2024). Statistics and data from meteorological stations. [In Persian]

Nepal, R., Al Irsyad, M. I., & Nepal, S. K. (2019). Tourist arrivals, energy consumption and pollutant emissions in a developing economy–implications for sustainable tourism. *Tourism Management*, *72*, 145-154. https://doi.org/10.1016/j.tourman.2018.08.025

Nezafat Takaleh, B., Esfandyari, F., & Shahbazi, Z. (2022). Investigating and evaluating the impact of hazards on tourism development (Case study: Meshkin Shahr City). *Geography and Human Relations*, 5(3), 184-204. [In Persian] https://doi.org/10.22034/gahr.2022.377338.1779

Partovi, P., Behzadifar, M., & Shirani, Z. (2016). Urban Design and Social Resilience: A Case Study: Jolfa Neighborhood in Isfahan City. *Journal of Architecture and Urban Planning*, *9*(17), 99-116. [In Persian] https://doi.org/10.30480/aup.2016.323

Piri, H., & Ansari, H. (2013). Drought Assessment in Sistan Plain and Its Impact on Hamoun International Wetland. *Wetland Scientific Research Quarterly*, *4*, 63-74. [In Persian] http://jweb.ahvaz.iau.ir/article-1-49-en.html

Rajaei, A. (2003). *Applications of Physical Geography in Urban and Rural Planning*. Tehran: Samt Publications. [In Persian]

Salehpour, S., Azizy, A., Karimi, Kh., & Zari Ghasemian, R. (2018). The role of risk management in reducing the socio-economic vulnerability of rural settlements with a focus on drought (Case study: Naqadeh County). *Journal of Geographical Territory*, *15*(58), 67-81. [In Persian] https://doi.org/10.22034/gahr.2020.246089.1437

Sobhani, P., & Esmaeilzadeh, H. (2020). The impact of climate change on tourism in protected areas (Case study: Alvand Wildlife Refuge). *Journal of Geography and Regional Planning*, *10*(37), 65-90. [In Persian] https://doi.org/10.22111/gaij.2020.5887

Tsai, H. T., Tseng, C. J., Tzeng, S. Y., & Wu, T. J. (2012). The impacts of natural hazards on Taiwan's tourism industry, *Natural Hazards*, *62*(1), 83-91. https://doi.org/10.1007/s11069-011-0034-z.

Walker, M., & Thers, A. (1996). Drought as a natural hazard. *Drought: A Global Assessment*, *1*(5), 3-18. http://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub

Wilhelmi, O. V., & Wilhite, D. A. (2002). Assessing vulnerability to agricultural drought: a Nebraska case study. *Natural Hazards*, *25*, 37-58. https://doi.org/10.1023/A:1013388814894

Zamanzadeh, S. M., Gadiri, M., Faraji Sabokbar, H., & Vaeezi, H. (2017). Impacts of Hazards on Tourism Development in the Town of Sarein. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *5*(4), 135-151. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geo.v5i4.56285

Zhang, J. (2004). Risk Assessment of Drought Disaster in the Maize-Growing Region of Songliao Plain, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *102*(2), 133-153. https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.08.003

Vol.14, No.2, Summer 2025, p.199-222 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI:10.22067/geoeh.2025.85466.1432 OPEN ACCESS

The Impact of Empowering Rural Women on Achieving Sustainable Development and Environmental Conservation (A Synthesis Study)

Mahtab Moosavi[1], Amir Ali Boroumand[2], Fatemeh Tabatabaei yazdi[3]*

[1, 2] Department of Environmental Planning and Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

[3] Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 21 November 2023

Revised: 07 March 2025

Accepted: 12 April 2025

Available Online: 12 April 2025

Keywords:

Environmental Education

Community-Based Participation

Women's Empowerment

Gender and Sustainable Development

Sustainable Rural Development

ABSTRACT

Women are considered one of the most important social groups, consistently highlighted in both theoretical and practical studies on "sustainability." Therefore, the present study, using a qualitative approach and the synthesis research method, examined the impact of empowering rural women on achieving sustainable development and environmental conservation. In this study, after conducting a comprehensive search, screening specialized literature, and multi-stage selection of credible scientific documents, open, axial, and selective coding of the findings was performed. The results revealed that the contexts and factors influencing/being influenced by the empowerment of rural women include "fundamental, institutional-organizational, and structural factors," "historically institutionalized inequalities," "unjust contexts of gender-sexual discrimination," and "transformative contexts." The challenges and obstacles to empowering rural women include "psychological challenges and obstacles," "educational challenges and obstacles," "lack of community participation," "economic challenges and obstacles," "legal limitations," "socio-cultural limitations," and "gender-based entrepreneurial limitations." Strategies for empowering rural women include "highlighting the role of women in sustainable rural development processes," "increasing access to creative, innovative, and modern technology ecosystems," "adopting a uniform approach to women's issues," "policy solutions for women's empowerment," and "modeling and presenting appropriate models." Additionally, the effects and benefits of empowering rural women include "stabilizing ownership, power, and role-playing contexts for women," "sustainable environmental conservation through women's role-playing," and "sustainable economic growth and social development through women's role-playing." In conclusion, the path to sustainable development and environmental conservation can begin with educating rural women and enhancing their capabilities, as there is a sequential cycle connecting environmental education, the empowerment of rural women, their active participation, and the achievement of environmental conservation.

*Corresponding Author's: Dr. Fatemeh Tabatabaei yazdi E-mail address: f.tabatabaei@um.ac.ir

How to cite this article: Moosavi, M., Borouamand, A. A., & Tabatabaei Yazdi, F. (2025). The Impact of Empowering Rural Women on Achieving Sustainable Development and Environmental Conservation (A Synthesis Study). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(2), 199-222. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.85466.1432

©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

Women, as one of the most important social groups, have always been a focus in theoretical and practical studies related to "sustainability" and "environmental conservation." According to the latest scientific findings and documents, their role in sustainable development and environmental conservation has been increasingly emphasized, particularly because women, especially in rural areas, have a significant impact on environmental and economic sustainability due to their direct connection with natural resources and family responsibilities. Empowering rural women not only improves their economic and social status but is also recognized as a key strategy for achieving sustainable development and environmental conservation. However, this process faces numerous challenges and obstacles that require careful examination and effective solutions. The present study, using a qualitative approach and the synthesis research method, investigates the impact of empowering rural women on achieving sustainable development and environmental conservation. The main objective of this research is to identify the contexts, influencing factors, challenges, solutions, and effects of empowering rural women in line with achieving sustainability goals.

Material and Methods

This study was conducted using the synthesis research method and a qualitative approach. In the first stage, a comprehensive search was conducted in reputable scientific databases to collect articles, reports, and documents related to the empowerment of rural women and its connection to sustainable development and environmental conservation. After the search, a multi-stage screening process was carried out to select relevant and credible scientific documents. In the next stage, the extracted data from these documents were analyzed using open, axial, and selective coding methods. Open coding helped identify initial and micro-level concepts, axial coding organized and categorized these concepts, and finally, selective coding established relationships between the concepts and shaped the theoretical framework of the research. This data analysis process led to the identification of contexts, influencing factors, challenges, solutions, and effects of empowering rural women.

Results and Discussion

Contexts and Factors Influencing/Influenced by the Empowerment of Rural Women
The findings of this study revealed that the empowerment of rural women is influenced by several factors, which are divided into four main categories:

1. Fundamental, Institutional-Organizational, and Structural Factors: These factors include policies, laws, and institutional structures that influence women's empowerment. For example, supportive laws and incentive policies can enhance women's participation in economic and social activities.
2. Historically Institutionalized Inequalities: Gender inequalities that have been historically ingrained in rural societies are a major obstacle to women's empowerment. These inequalities include limited access to resources, education, and employment opportunities.
3. Unjust Contexts of Gender-Sexual Discrimination: Gender discrimination in rural societies deprives women of equal opportunities to participate in economic and social activities.
4. Transformative Contexts: These contexts include opportunities that can lead to positive changes in the status of rural women, such as access to modern technologies, specialized training, and support networks.

Challenges and Obstacles to the Empowerment of Rural Women

The empowerment of rural women faces numerous challenges and obstacles, including:

1. Psychological Challenges and Obstacles: Lack of self-esteem, self-efficacy, and confidence among rural women are major barriers to their empowerment.
2. Educational Challenges and Obstacles: Limited access to quality education and a lack of girls' educational centers in rural areas hinder the enhancement of women's capabilities.

3. Lack of Community Participation: The absence of community involvement in women's empowerment programs and negative attitudes toward these programs are significant challenges.
4. Economic Challenges and Obstacles: Insufficient funding for empowerment programs and the financial difficulties faced by rural women hinder the achievement of sustainability goals.
5. Legal Limitations: Restrictive laws and complex permit acquisition processes for empowerment programs are major obstacles.
6. Socio-Cultural Limitations: Social norms and traditions that confine women to traditional roles hinder their empowerment.
7. Gender-Based Entrepreneurship Limitations: Gender inequalities in access to entrepreneurial opportunities prevent women from participating in economic activities.

Strategies for Empowering Rural Women

To overcome the challenges and obstacles to empowering rural women, several strategies have been proposed, including:

1. Highlighting the Role of Women in Sustainable Rural Development Processes: Increasing women's participation in local and supra-local decision-making and strengthening their role in sustainable development projects.
2. Increasing Access to Creative, Innovative, and Modern Technology Ecosystems: Providing online and virtual education, improving access to high-speed internet, and developing technological infrastructure in rural areas.
3. Uniform Approach to Women's Issues: Creating integrated and coordinated policies for empowering women at local to national levels.
4. Policy Solutions for Women's Empowerment: Formulating supportive laws, providing micro-credits, and establishing support networks for rural women.
5. Modeling and Presenting Appropriate Models: Introducing successful examples of rural women's empowerment and encouraging others to follow these models.

Effects and Benefits of Empowering Rural Women

Empowering rural women has numerous positive effects, including:

1. Stabilizing Ownership, Power, and Role-Playing Contexts for Women: Increasing women's access to financial resources and land, strengthening their decision-making power, and creating suitable contexts for their role-playing.
2. Sustainable Environmental Conservation with Women's Role-Playing: Women's participation in environmental conservation and sustainable development projects leads to reduced conservation costs and improved natural resource management.
3. Sustainable Economic Growth and Social Development with Women's Role-Playing: Empowering rural women contributes to increased household income, poverty reduction, and improved social development indicators.

Conclusion

The results of this study indicate that empowering rural women plays a key role in achieving sustainable development and environmental conservation. The path to sustainable development and environmental conservation can begin with educating rural women and enhancing their capabilities, as there is a sequential cycle between environmental education, empowering rural women, their active participation, and achieving environmental conservation. To achieve these goals, it is necessary to strengthen the contexts and factors influencing the empowerment of rural women, identify and address existing challenges and obstacles, and implement effective strategies for empowering rural women. Ultimately, empowering rural women not only improves their economic and social status but is also recognized as a key strategy for achieving sustainable development and environmental conservation.

ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076 جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص۲۲۲-۱۹۹

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI:10.22067/geoeh.2025.85466.1432 دسترسی آزاد

مطالعه تأثیر توانمندسازی زنان روستایی در دست‌یابی به توسعه پایدار و حفاظت محیط‌زیست (یک مطالعه سنتزپژوهی)

مهتاب موسوی[۱]، امیرعلی برومند[2]، فاطمه طباطبایی یزدی[3*]

[۲،۱] گروه برنامه‌ریزی و مدیریت محیط‌زیست و HSE، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۳] گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

کلمات کلیدی:

آموزش زیست‌محیطی

جامعه مشارکت محور

توانمندسازی زنان

جنسیت و توسعه پایدار

توسعه روستایی پایدار

چکیده

زنان از گروه‌های مهم اجتماعی به شمار می‌روند که در مطالعات نظری و عملی «پایداری» همواره بر آنان تمرکز می‌شود. بنابراین، مطالعه حاضر با رویکرد کیفی و روش سنتزپژوهی تأثیر توانمندسازی زنان روستایی در دست‌یابی به توسعه پایدار و حفاظت محیط‌زیست را بررسی کرد. در این مطالعه پس از جست‌وجو، غربالگری ادبیات تخصصی و گزینش چند مرحله‌ای اسناد علمی معتبر، کدگذاری باز، بسته و محوری یافته‌ها صورت گرفت. نتایج نشان داد زمینه‌ها و عوامل اثرگذار/اثرپذیر بر/از توانمندسازی زنان روستایی عبارتند از «عوامل بنیادین، نهادی-سازمانی و ساختاری»، «نابرابری‌های نهادینه شده تاریخی»، «زمینه‌های ناعادلانه‌ی تبعیض‌های جنسی-جنسیتی» و «بسترهای تحول‌آفرین». چالش‌ها و موانع توانمندسازی زنان روستایی عبارتند از «چالش‌ها و موانع روانشناختی»، «چالش‌ها و موانع آموزشی»، «نداشتن مشارکت جامعه»، «چالش‌ها و موانع اقتصادی»، «محدودیت‌های قانونی»، «محدودیت‌های اجتماعی-فرهنگی» و «محدودیت‌های جنسیت‌بنیان کارآفرینی». راهکارهای توانمندسازی زنان روستایی عبارتند از «پررنگ‌سازی نقش زنان در فرآیند توسعه پایدار روستایی»، «افزایش دسترسی به زیست‌بوم خلاقیت، نوآوری و تکنولوژی‌های نوین»، «برخورد همگن با مسائل زنان»، «راهکارهای سیاستی برای توانمندسازی زنان» و «الگوسازی و ارائه الگوهای مناسب». هم‌چنین اثرات و فواید توانمندسازی زنان روستایی عبارتند از «تثبیت مالکیت، قدرت و زمینه‌های نقش‌آفرینی زنان»، «حفاظت پایدار محیط‌زیست با نقش‌آفرینی زنان» و «رشد پایدار اقتصادی و توسعه اجتماعی با نقش‌آفرینی زنان». نتیجه آن که مسیر توسعه پایدار و حفاظت محیط‌زیست می‌تواند از آموزش زنان روستایی و افزایش توانمندی‌های آنان آغاز شود زیرا چرخه‌ای به‌ترتیب میان آموزش محیط‌زیست، توانمندسازی زنان روستایی، میزان مشارکت فعال آنان و دستیابی به حفاظت محیط‌زیست برقرار است.

*نویسنده مسئول: دکتر فاطمه طباطبایی یزدی E-mail: f.tabatabaei@um.ac.ir

مقدمه

انسان همواره برای اطمینان یافتن از بقا، نیازمند محیطی مساعد برای زیست بر روی کره خاکی بوده است. این محیط که سال‌ها بستر امنی برای تأمین نیازهای او بوده، امروزه با رشد فزاینده جمعیت در سراشیبی کم‌توانی و نابودی قرار گرفته است (Botkin & Keller, 2015). رشد تصاعدی جمعیت انسان در مقابل جایگزینی و ترمیم خطی طبیعت، اثرات قابل توجهی را به همراه دارد. آلودگی آب، هوا، خاک، از بین رفتن تنوع‌زیستی و چشم‌اندازهای طبیعی در پی بهره‌برداری‌های متوالی در جهت تامین نیازها، محیط‌زیست انسان را با تهدید جدی مواجه کرده است (Miller, 2008). تهدیدات محیط‌زیستی طیف وسیعی از مشکلات درهم تنیده را در بر می‌گیرد که اثرات آن بر تمام مناطق و تمام انسان‌ها یکسان نیست. یکی از آسیب‌پذیرترین جوامع متاثر از این تهدیدها، زنان و کودکان هستند. نابرابری‌ها و محدودیت‌های جنسیت‌بنیان[1] زنان مانند پائین بودن میزان برخورداری از منابع، ازدواج در سنین پائین، بازماندن از امور آموزشی و تحصیل، کم‌سوادی و غیره منجر به محدود و کم‌رنگ شدن نقش زن در جامعه می‌شود (Seifi, 2019). ذات زنان با حفاظت از طبیعت[2] گره خورده است. زنان به علت برعهده داشتن نقش مادری، سهم بزرگی در پرورش نسل آینده، انتقال آداب و فرهنگ و روش‌های اصولی زیست دارند (Zain-al-Abedin Amoghin & Ghorbaninezhad, 2022). بنابراین تسهیل دست‌یابی به حراست و حفاظت از منابع طبیعی و محیط‌زیست می‌تواند ماحصل تربیت و پرورش آگاهانه زنان باشد که توانایی‌های اکتسابی آنان در این زمینه نقش پررنگی دارد (Lahijanian & Vaskoui, 2016).

بنابر آمار سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد (FAO)[3] در سال ۲۰۱۷، زنان روستایی ۴۳ درصد نیروی کار کشاورزی کشورهای درحال توسعه را تشکیل می‌دهند (Azimi, Alibeigi & Papzan, 2023). با توجه به ارتباط تنگاتنگ میان انسان و محیط‌زیست در روستاها به‌دلیل اتکاء شغل روستائیان بر منابع طبیعی و به‌طور ویژه‌تر تعامل و همبستگی زیاد میان زنان روستایی و محیط‌زیستشان به‌سبب نقش‌آفرینی قابل توجه در کشاورزی، دام‌پروری، صنایع دستی و غیره می‌تواند پلی برای تسهیل دست‌یابی به حفاظت پایدار محیط‌زیست باشد (Khorramdel & Vali Elahi Bisheh, 2023). چراکه اجرای برنامه‌های مدیریتی و حفاظتی مستلزم حضور فعال، همکاری و استفاده از دانش جوامع محلی خواهد بود که توانمندسازی[4] می‌تواند پیش‌نیاز موارد فوق‌الذکر باشد (Samadi Kouchaksaraei, Rezaei Toabeh, Gholamzadeh, Zohrabi & Moradi, 2013).

اصطلاح توانمندسازی برای اولین بار در اواخر دهه ۸۰ و اوایل دهه ۹۰ در بحث‌های جنسیت و توسعه ظاهر شد (Parpart, 2008). توانمندسازی دربرگیرنده معانی و مفاهیمی نظیر قدرت، اختیار و اثرگذاری است و از آن به‌عنوان فرآیندی یاد می‌شود که به فرد، آزادی عمل و قدرت بخشیده می‌شود تا بر روی زندگی و موقعیتی که در آن واقع شده، کنترل و تسلط بیشتری داشته باشد (Azimi, Alibeigi & Papzan, 2023). این فرآیند در شخصیت و عملکرد افراد تاثیرگذار بوده و منجر به قدرت تجزیه و تحلیل، استقلال در تصمیم‌گیری، خلاقیت، ابتکارعمل، تشخیص فرصت‌ها و چالش‌ها و در نهایت بروز عملکرد مناسب در مواجهه با آن‌ها می‌شود (Lalianpour, Dosti & Mohammadzadeh, 2011).

هدف از پژوهش حاضر بررسی اثرات توانمندسازی زنان روستایی بر حفاظت پایدار و موثر از محیط‌زیست به روش سنتزپژوهی است. این پژوهش سعی دارد تا رابطه‌ی میان آموزش و توانمندسازی زنان روستایی را بررسی کند و به جست و جوی اثر آن بر مشارکت فعال آنان در پروژه‌های مدیریتی و حفاظتی و نتایج متقابل این عوامل بر هم بپردازد.

1- Gender based
2- Nature conservation
3-Food and Agriculture Organization of the United Nations
4- Empowerment

مواد و روش‌ها

این پژوهش با بهره‌گیری از روش سنتزپژوهی انجام شده است. سنتزپژوهی به‌عنوان یک روش نظام‌مند و ساختاریافته، به محققان این امکان را می‌دهد تا با بررسی، ترکیب و تحلیل یافته‌های پژوهش‌های پیشین، به درکی جامع و عمیق از موضوع مورد مطالعه دست یابند. این روش به‌ویژه در حوزه‌هایی که نیاز به شناسایی شکاف‌های علمی، تعارضات موجود و یا الگوهای تکرارشونده در تحقیقات پیشین وجود دارد، بسیار کارآمد است.

هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر توانمندسازی زنان روستایی بر مشارکت فعال و نقش‌آفرینی آنان در حفاظت از محیط‌زیست است. برای دستیابی به این هدف، لازم بود تا ادبیات تخصصی و پیشینه مطالعاتی این حوزه به‌طور کامل بررسی شود. سنتزپژوهی به‌عنوان روشی مناسب، این امکان را فراهم کرد تا با تحلیل و ترکیب یافته‌های پژوهش‌های پیشین، به دیدگاهی کلی و یکپارچه از موضوع دست یابیم. در این راستا، فرآیند پژوهش به‌صورت گام‌به‌گام و با رعایت اصول روش‌شناسی دقیق انجام شد. این فرآیند شامل مراحل جستجوی نظام‌مند مقالات، غربالگری، انتخاب نهایی منابع و تحلیل یافته‌ها بود. در ادامه، هر یک از این مراحل به‌تفصیل شرح داده شده‌اند.

جمع‌آوری داده‌ها

فرآیند جمع‌آوری داده‌ها با جستجوی نظام‌مند در پایگاه‌های علمی معتبر آغاز شد. پایگاه‌هایی همچون Elsevier، Google Scholar، SID و MDPI به‌عنوان منابع اصلی انتخاب شدند. این پایگاه‌ها به دلیل پوشش گسترده‌ی مقالات علمی-پژوهشی، مروری، همایشی و پایان‌نامه‌ها، امکان دسترسی به ادبیات غنی و متنوعی را فراهم کردند.

برای جستجوی مقالات، از ترکیبی از واژگان کلیدی مرتبط با موضوع پژوهش استفاده شد. واژگانی همچون "توانمندسازی زنان روستایی"، "مشارکت زنان در حفاظت از محیط‌زیست"، "نقش‌آفرینی زنان در توسعه پایدار" و "جنسیت و محیط‌زیست" مورد استفاده قرار گرفتند. این واژگان با استفاده از عملگرهای بولین (مانند AND، OR) ترکیب شدند تا دقت جستجو افزایش یابد.

در مرحله اول، ۴۵۶ مقاله مرتبط شناسایی شد. این مقالات شامل انواع مقالات علمی-پژوهشی، مروری، همایشی و پایان‌نامه‌ها بودند. در ادامه، با اعمال محدودیت بازه زمانی (به‌عنوان مثال، مقالات منتشر شده در ۱۰ سال اخیر)، تعداد مقالات به ۳۹۱ مورد کاهش یافت. این محدودیت به‌منظور تمرکز بر پژوهش‌های به‌روز و مرتبط با شرایط کنونی اعمال شد.

غربالگری و گزینش نهایی مقالات

پس از جمع‌آوری اولیه مقالات، فرآیند غربالگری آغاز شد. در مرحله اول، عناوین مقالات بررسی شدند تا مقالاتی که به‌طور واضح با موضوع پژوهش مرتبط نبودند، حذف شوند. این مرحله منجر به انتخاب ۷۰ مقاله مرتبط شد. در این مرحله، دقت زیادی به‌کار رفت تا اطمینان حاصل شود که هیچ مقاله مرتبطی از قلم نیفتد.

در مرحله بعد، چکیده‌ی ۷۰ مقاله انتخاب‌شده به‌دقت بررسی شد. هدف از این مرحله، شناسایی مقالاتی بود که به‌طور مستقیم به موضوع توانمندسازی زنان روستایی و نقش آنان در حفاظت از محیط‌زیست پرداخته بودند. پس از این بررسی، ۳۱ مقاله به‌عنوان مقالات مرتبط انتخاب شدند. این مقالات به‌طور خاص بر تأثیر توانمندسازی زنان بر مشارکت آنان در فعالیت‌های محیط‌زیستی تمرکز داشتند. در نهایت، متن کامل ۳۱ مقاله بررسی شد تا از کیفیت و ارتباط کامل آن‌ها با موضوع پژوهش اطمینان حاصل شود. پس از این مرحله، ۲۵ مقاله به‌عنوان منابع نهایی انتخاب شدند. این مقالات به‌طور کامل تحلیل شده و یافته‌های آن‌ها در تدوین پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفت.

تحلیل داده‌ها

برای تحلیل یافته‌های مقالات انتخاب‌شده، محتوای آن‌ها چندین بار بررسی و براساس شبکه مضامین نهفته کدگذاری شدند تا مفاهیم کلیدی، الگوها و روندهای موجود در پژوهش‌های پیشین شناسایی شوند. در این فرآیند، یافته‌های هر مقاله به‌طور جداگانه بررسی و کدگذاری شدند. در جدول ۱، اهم یافته‌های حاصل از کدگذاری سه مرحله‌ای ارائه شده است. این جدول به‌عنوان یک ابزار مرجع، امکان مقایسه و تحلیل یافته‌های پژوهش‌های مختلف را فراهم کرده است. از این طریق، الگوهای تکرارشونده، تعارضات موجود و شکاف‌های علمی به‌وضوح شناسایی شدند.

جدول ۱- کدگذاری سه مرحله‌ای یافته‌های مقالات برگزیده در پژوهش حاضر

Table 1- Three-step coding of the findings of the selected articles in the present study

کد محوری Core Code	کد بسته Axial Code	کدهای باز Open Codes
زمینه‌ها و عوامل اثرگذار/اثرپذیر بر/از توانمندسازی زنان روستایی Contexts and Factors Influencing/ Influenced by the Empowerment of Rural Women	عوامل بنیادین، نهادی-سازمانی و ساختاری Fundamental, Institutional-Organizational, and Structural Factors	میزان دسترسی زنان روستایی به منابع پایه –فرصت‌های آموزش‌های فنی و حرفه‌ای برای زنان – حمایت دولت از زنان کشاورز – میزان وابستگی مالی زنان به مردان - قدرت شبکه‌های حمایتی برای زنان - بیمه برای زنان کشاورز و ... Access to technical and vocational training opportunities for women - Government support for women farmers - Level of financial dependence of women on men - Strength of support networks for women - Insurance for women farmers, etc.
	نابرابری‌های نهادینه شده تاریخی Historically Institutionalized Inequalities	محرومیت زنان از مالکیت زمین - اجرای ضعیف قوانین - محدودیت در سرمایه‌گذاری، نقش‌های چندگانه زنان، نبود بازارهای محلی برای کشاورزان و فعالان اقتصادی زن - کودک همسری – فقر آگاهی نسبت به حقوق زنان و ... Weak enforcement of laws - Limitations in investment - Multiple roles of women - Lack of local markets for women farmers and entrepreneurs - Child marriage - Lack of awareness about women's rights, etc.
	زمینه‌های ناعادلانه‌ی تبعیض‌های جنسی-جنسیتی Unjust Contexts of Gender-Sexual Discrimination	دسترسی محدود به آموزش باکیفیت در سطوح عمومی و تخصصی برای زنان - کمبود خدمات بهداشتی ویژه مسائل و بیماری‌های زنانه - محدودیت در مشارکت نیروی کار - کمبود مراکز آموزشی دخترانه در مناطق روستایی و ... Limited access to quality education at general and specialized levels for women - Lack of health services addressing women's specific issues and diseases - Restrictions on labor force participation - Shortage of girls' educational centers in rural areas, etc.
	بسترهای تحول‌آفرین Transformative Contexts	تأثیر تحصیلات شوهر بر تصمیم‌گیری برای کمیت و کیفیت فرصت‌های توانمندسازی و نقش‌آفرینی زنان روستایی - نقش شاخص ثروت خانوار – چرخش‌های تحول‌آفرین فرهنگی به نفع حضور اجتماعی زنان – فرصت‌های استقلال مالی زنان – توسعه فرصت‌های مشارکت زنان روستایی در تصمیم‌گیری‌های محلی و فرامحلی و ... Influence of husband's education on the quantity and quality of empowerment opportunities for rural women - Role of household wealth index - Cultural transformative shifts favoring women's social presence - Opportunities for women's financial independence - Development of opportunities for rural women's participation in local and supra-local decision-making, etc.
چالش‌ها و موانع توانمندسازی زنان روستایی Challenges and Obstacles to the	چالش‌ها و موانع روانشناختی Psychological Challenges and Obstacles	ریسک‌پذیری کمتر زنان - کمبود عزت نفس، خودکارآمدی، استقلال عمل و اعتماد به نفس در زنان روستایی - کمبود حمایت‌های منطقی خانواده‌ها از زنان روستایی– ضعف کمی و کیفی شبکه‌های حمایتی روحی-روانی برای زنان و دختران روستایی و ... Lack of self-esteem, self-efficacy, autonomy, and confidence among rural women - Insufficient logical family support for rural women - Weak quantitative

	and qualitative emotional-psychological support networks for rural women and girls, etc.	Empowerment of Rural Women
چالش‌ها و موانع آموزشی Educational Challenges and Obstacles	کمبود آموزش‌های عملی برای توانمندسازی زنان روستایی - محدودیت‌های بودجه‌ای، زمانی و امکاناتی – ناکافی بودن اراده اداری در سازماندهی برنامه‌های عملی و … Insufficient practical and applied training for empowering rural women - Budgetary, time, and resource limitations - Inadequate administrative will to organize practical programs, etc.	
نداشتن مشارکت جامعه Lack of Community Participation	نداشتن مشارکت جامعه در برنامه‌های توانمندسازی زنان روستایی - بی‌توجهی به برنامه‌های ترویجی ویژه زنان در جوامع محلی - نگرش منفی نسبت به برنامه‌های آموزشی به عنوان فعالیت‌های وقت‌گیر و بی‌فایده - عدم جلب مشارکت جوامع محلی از طریق برنامه‌های آموزشی جذاب و کاربردی و … Lack of community participation in rural women's empowerment programs - Neglect of promotional programs for women in local communities - Negative attitudes toward educational programs as time-consuming and futile activities - Failure to engage local communities through attractive and practical educational programs, etc.	
چالش‌ها و موانع اقتصادی Economic Challenges and Obstacles	چالش‌های اقتصادی در تأمین منابع توانمندسازی زنان روستایی - کمبود بودجه برای خرید منابع توانمندسازی زنان روستایی مانند کتاب‌ها و وسایل کمک‌آموزشی - مشکلات مالی بیشتر در مناطق محروم - محدودیت در اجرای برنامه‌های عملی به دلیل کمبود بودجه و …. Economic challenges in securing resources for rural women's empowerment - Lack of budget for purchasing empowerment resources such as books and educational tools - Greater financial difficulties in deprived areas - Limitations in implementing practical programs due to budget shortages, etc.	
محدودیت‌های قانونی Legal Limitations	محدودیت‌های قانونی و حقوقی در توانمندسازی زنان روستایی - فرآیند پیچیده و زمان‌بر اخذ مجوز برای برنامه‌های عملی توانمندسازی زنان روستایی - قوانین محدودکننده مشارکت زنان در فرآیندهای برنامه‌ریزی توسعه روستایی و منطقه‌ای و … Complex and time-consuming process of obtaining permits for rural women's empowerment programs - Restrictive laws on women's participation in rural and regional development planning processes, etc.	
محدودیت‌های اجتماعی-فرهنگی Socio-Cultural Limitations	توجه ناکافی به ابعاد اجتماعی و فرهنگی - نداشتن رویکرد بومی در توانمندسازی زنان روستایی توسط سیاست‌گذاران کلان و میانی و عدم توجه به مختصات محلی و بومی - عدم توجه به ظرفیت اجتماعی-فرهنگی زنان در حل مسائل محیط‌زیستی و … Lack of a local approach in empowering rural women by macro and mid-level policymakers - Ignoring local and indigenous contexts - Neglecting the socio-cultural capacity of women in addressing environmental issues, etc.	
محدودیت‌های جنسیت‌بنیان کارآفرینی Gender-Based Entrepreneurship Limitations	مشکلات مدیریتی در حلقه‌های زنجیره خلق ارزش زنان در زیست بوم نوآوری و کارآفرینی روستایی - ضعف در حکمرانی کلان زیست بوم خلق ارزش کشور برای اعطای فرصت‌های عادلانه به زنان برای ورود به عرصه‌های کارآفرینی و خلق ثروت و … Managerial Issues in Women's Value Creation Ecosystem - Weaknesses in the governance of the national value creation ecosystem in providing fair opportunities for women to enter entrepreneurship and wealth creation, etc.	
پررنگ‌سازی نقش زنان در فرآیند توسعه پایدار روستایی Highlighting the Role of Women in Sustainable Rural	پررنگ‌سازی نقش و مشارکت زنان در پروژه‌های محیط‌زیست و توسعه پایدار - کاهش هزینه‌های حفاظتی براثر حفاظت مشارکتی - آموزش زنان و دختران برای رهبری پروژه‌های حفاظت محیط‌زیست و توسعه پایدار و … Highlighting Women's Role in Environmental and Sustainable Development Projects - Reducing conservation costs through participatory conservation -	راهکارهای توانمندسازی زنان روستایی Strategies for the Empowerment of Rural Women

Development Processes	Training women and girls to lead environmental conservation and sustainable development projects, etc.
راهکارهای سیاستی برای توانمندسازی زنان Policy Solutions for Women's Empowerment	افزایش دسترسی زنان به منابع مالی - بهبود قوانین مالکیت زمین برای زنان و ایجاد مزیت‌های نسبی برای آن‌ها - ایجاد شبکه‌های حمایتی برای زنان - ایجاد تشکل‌های زنان روستایی - ارائه خدمات مشاوره‌ای و حقوقی به زنان روستایی و ... Increasing Women's Access to Financial Resources - Improving land ownership laws for women and creating relative advantages for them - Establishing support networks for women in various fields - Forming rural women's associations - Providing advisory and legal services to rural women, etc.
افزایش دسترسی به زیست بوم خلاقیت، نوآوری و تکنولوژی‌های نوین Increasing Access to Creative Ecosystems, Innovation, and Modern Technologies	ارایه آموزش‌های آنلاین و مجازی به زنان و دختران روستایی - بهبود دسترسی به اینترنت پرسرعت و کامپیوتر - ارتقا مهارت معلمان و دانش‌آموزان زن در استفاده از ابزارهای آنلاین - رفع محدودیت‌های اداری و افزایش دسترسی به زیست بوم خلاقیت، نوآوری و تکنولوژی‌های نوین - توسعه زیرساخت‌های فناوری در مدارس دخترانه روستایی و ... Offering online and virtual education to rural women and girls - Improving access to high-speed internet and computers - Enhancing the skills of female teachers and students in using online tools - Removing administrative barriers and increasing access to creative, innovative, and modern technology ecosystems - Developing technological infrastructure in rural girls' schools, etc.
برخورد همگن با مسائل زنان Homogeneous Approach to Women's Issues	برخورد همگن با مسائل زنان در سطوح محلی تا ملی – افزایش بودجه و هماهنگ‌سازی برنامه‌های آموزش و توانمندسازی زنان روستایی در سطوح محلی تا ملی هماهنگی بین مناطق و استان‌ها برای اجرای برنامه‌های حفاظتی با رهبری زنان روستایی و ... A uniform approach to women's issues from local to national levels - Increasing budgets and harmonizing rural women's education and empowerment programs from local to national levels - Coordination between regions and provinces for implementing conservation programs led by rural women, etc.
الگوسازی و ارائه الگوهای مناسب Modeling and Providing Appropriate Models	ارائه الگوها و نمونه‌های موفق برای توانمندسازی زنان روستایی – برجسته‌سازی نمونه‌های عملی و موفق نقش‌آفرینی زنان در توسعه روستایی - آموزش و توانمندسازی زنان روستایی در استفاده از فناوری‌های جدید و معرفی افراد پیشرو و .. Showcasing successful practical examples of women's role in rural development - Training and empowering rural women in using new technologies - Introducing pioneering individuals, etc.

تثبیت مالکیت زمین توسط زنان روستایی براساس مولفه‌های جمعیت‌شناختی - مبارزه برای دسترسی عادلانه به منابع – کاهش بروز و ظهور هنجارهای مرسوم محدودکننده زنان در جوامع روستایی - تقویت قوانین حمایتی برای زنان روستایی و ... Securing land ownership for rural women based on demographic factors - Advocating for fair access to resources - Reducing the prevalence of restrictive norms for women in rural communities - Strengthening supportive laws for rural women, etc.	تثبیت مالکیت، قدرت و زمینه‌های نقش‌آفرینی زنان Stabilizing Ownership, Power, and Contexts for Women's Role-Playing	اثرات و فواید توانمندسازی زنان روستایی Effects and Benefits of the Empowerment of Rural Women
کاهش آسیب‌پذیری زنان در برابر مخاطرات طبیعی - کاهش نابرابری‌های جنسیتی – توجه به نیاز زنان به مشارکت زنان در مدیریت ریسک مخاطرات محیطی – تقویت زیرساخت‌های پایش و اندازه‌گیری اطلاعات اقلیمی و ... Reducing Women's Vulnerability to Natural Hazards - Reducing gender inequalities - Addressing women's need for participation in environmental risk management - Strengthening infrastructure for monitoring and measuring climatic information, etc.	حفاظت پایدار محیط‌زیست با نقش‌آفرینی زنان Sustainable Environmental Protection with Women's Role-Playing	
فقرزدایی از زنان روستایی – تأمین اعتبارات خرد برای توانمندسازی زنان - تقویت سیاسی زنان – بهبود دسترسی زنان روستایی به اعتبارات بانکی – آموزش‌های تخصصی به زنان خصوصا زنان بزه‌دیده، سرپرست خانوار و دارای معلولیت و ... Providing micro-credits for women's empowerment - Political empowerment of women - Improving rural women's access to banking credits - Enhancing specialized training for women, especially victims of crime, female-headed households, and women with disabilities, etc.	رشد پایدار اقتصادی و توسعه اجتماعی با نقش‌آفرینی زنان Sustainable Economic Growth and Social Development with Women's Role-Playing	

اعتبار و پایایی پژوهش

برای اطمینان از اعتبار و پایایی فرآیند سنتزپژوهی، تمام مراحل جستجو، غربالگری و تحلیل مقالات به‌صورت سیستماتیک و با دقت انجام شد. علاوه بر این، فرآیند غربالگری و انتخاب مقالات توسط دو پژوهشگر به‌صورت مستقل انجام شد و در مواردی که اختلاف نظر وجود داشت، با بحث و تبادل نظر به توافق رسیدند. این رویکرد به افزایش پایایی و اعتبار نتایج کمک کرد. در نهایت، یافته‌های پژوهش حاضر با استناد به منابع معتبر و تحلیل نظام‌مند مقالات پیشین ارائه شده‌اند. این رویکرد، امکان تعمیم‌پذیری نتایج را فراهم کرده و به‌عنوان پایه‌ای برای پژوهش‌های آینده در این حوزه عمل می‌کند.

نتایج و بحث

بررسی یافته‌های مقالات منتخب جهت سنتزپژوهی تأثیر توانمندسازی زنان روستایی در دست‌یابی به توسعه پایدار و حفاظت محیط‌زیست نشان داد زمینه‌ها و عوامل اثرگذار/اثرپذیر بر/از توانمندسازی زنان روستایی عبارتند از «عوامل بنیادین، نهادی-سازمانی و ساختاری»، «نابرابری‌های نهادینه شده تاریخی»، «زمینه‌های ناعادلانه‌ی تبعیض‌های جنسی-جنسیتی» و «بسترهای تحول‌آفرین». چالش‌ها و موانع توانمندسازی زنان روستایی عبارتند از «چالش‌ها و موانع روانشناختی»، «چالش‌ها و موانع آموزشی»، «نداشتن مشارکت جامعه»، «چالش‌ها و موانع اقتصادی»، «محدودیت‌های قانونی»، «محدودیت‌های اجتماعی-فرهنگی» و «محدودیت‌های جنسیت‌بنیان برای کارآفرینی». راهکارهای توانمندسازی زنان روستایی عبارتند از «پررنگ‌سازی نقش زنان در فرآیند توسعه پایدار روستایی»، «افزایش دسترسی به زیست بوم خلاقیت، نوآوری و تکنولوژی‌های نوین»، «برخورد همگن با مسائل زنان»، «راهکارهای سیاستی برای توانمندسازی زنان» و «الگوسازی و ارائه الگوهای مناسب». هم‌چنین اثرات و فواید توانمندسازی زنان روستایی عبارت بودند از «تثبیت مالکیت، قدرت و زمینه‌های نقش‌آفرینی زنان»، «دستیابی به توسعه پایدار و حفاظت پایدار محیط‌زیست با

نقش‌آفرینی زنان» و «رشد پایدار اقتصادی و توسعه اجتماعی با نقش‌آفرینی زنان». که در ادامه به تبیین و تفسیر این نتایج پرداخته می‌شود.

زمینه‌ها و عوامل اثرگذار/اثرپذیر بر/از توانمندسازی زنان

زمینه‌ها و عوامل اثرگذار/اثرپذیر بر/از توانمندسازی زنان ممکن است به نتایج متفاوتی منجر شود (Ndiritu, Kassie & Shiferaw, 2014). بررسی ادبیات نشان می‌دهد، در اکثر خانواده‌ها مردان تصمیم‌گیری را انجام می‌دهند و در برخی از خانواده‌ها، تصمیم‌گیری مشترک است که اگر اختلاف نظر ایجاد شود، مرد تصمیم‌گیرنده «نهایی» است. ما این یافته‌ها را تکرار می‌کنیم و خاطرنشان می‌کنیم که زنان متاهل از خودمختاری بسیار زیادی در رابطه با تصمیم‌های کوچک روزانه استفاده می‌کنند، اما مردان تصمیمات مهمی در مورد منابع، مخارج و هر چیزی که شامل مبالغ هنگفتی باشد می‌گیرند. با این حال خانواده‌هایی که مشارکت عادلانه میان زن و مرد را به رسمیت می‌شناسند، فرصت بیشتری برای شکوفایی توانایی زنان در مدیریت خلاق و ارائه‌ی نوآوری از سوی آنان در اختیارشان قرار می‌دهند (Alemayehu & Meskele, 2017).

عوامل بنیادین، نهادی-سازمانی و ساختاری

توانمندسازی زنان روستایی یکی از ارکان اصلی توسعه پایدار است که تحت تأثیر عوامل بنیادین، نهادی-سازمانی و ساختاری قرار دارد. دسترسی زنان به منابع پایه مانند آموزش‌های فنی و حرفه‌ای، حمایت دولت از زنان کشاورز، و دسترسی به بازارهای فروش، از جمله عوامل بنیادین محسوب می‌شوند. در این راستا یافته‌های جعفری و همکاران (Jafari, Parvarinejad & Khalilnejadi, 2023) نشان داد آموزش‌های فنی و حرفه‌ای نه تنها مهارت‌های زنان را ارتقا می‌دهد، بلکه آن‌ها را برای ورود به بازار کار و مشارکت اقتصادی آماده می‌کند. این امر به زنان روستایی کمک می‌کند تا از نظر اقتصادی مستقل شده و نقش فعال‌تری در جامعه ایفا کنند.» بدون شک، این عوامل بنیادین پایه‌ای محکم برای توانمندسازی زنان فراهم می‌کنند.

عوامل نهادی-سازمانی نیز نقش بسزایی در توانمندسازی زنان روستایی ایفا می‌کنند. هم‌چنین بهبود زیرساخت‌های روستایی مانند دسترسی به آب آشامیدنی سالم، برق، و راه‌های ارتباطی، به طور مستقیم بر کیفیت زندگی زنان تأثیر می‌گذارد. در این راستا نتایج مطالعه مباشری شیری و اصغری لفمجانی (Mobashari Shiri & Asghari Lafamjani, 2021) نشان داد بهبود زیرساخت‌های روستایی نه تنها شرایط زندگی را بهتر می‌کنند، بلکه فرصت‌های اقتصادی را نیز برای زنان روستایی افزایش می‌دهند. علاوه بر این، توجه به ابعاد اجتماعی و فرهنگی نقش زنان در توسعه پایدار، از جمله عوامل نهادی است که می‌تواند به کاهش نابرابری‌های جنسیتی و افزایش مشارکت زنان در جامعه کمک کند. این عوامل نهادی بستری مناسب برای رشد و پیشرفت زنان روستایی ایجاد می‌کنند.

در نهایت، عوامل ساختاری مانند وجود شبکه‌های حمایتی قوی و اجرای قوانین حمایتی، نقش کلیدی در توانمندسازی زنان روستایی دارند. این شبکه‌ها و قوانین می‌توانند از زنان در برابر تبعیض و نابرابری‌های جنسیتی محافظت کنند و به آن‌ها امکان دهند تا در عرصه‌های اقتصادی، اجتماعی و سیاسی مشارکت فعال‌تری داشته باشند. اجرای سیاست‌های حمایتی و ایجاد تشکل‌های زنان روستایی نیز می‌تواند به تقویت همبستگی و همکاری میان آن‌ها منجر شود. در نتیجه، ترکیب این عوامل ساختاری با عوامل بنیادین و نهادی-سازمانی، مسیر توانمندسازی زنان روستایی را هموار کرده و آن‌ها را به عنوان نیروهای مؤثر در توسعه پایدار جامعه مطرح می‌کند.

نابرابری‌های نهادینه شده تاریخی

نابرابری‌های نهادینه شده تاریخی، از جمله محرومیت زنان از مالکیت زمین، اجرای ضعیف قوانین، و محدودیت در دسترسی به منابع آبی و فناوری‌های نوین، از موانع اصلی توانمندسازی زنان روستایی محسوب می‌شوند. این نابرابری‌ها ریشه در ساختارهای

سنتی و فرهنگی دارد که زنان را در موقعیتی فرودست نسبت به مردان قرار می‌دهد. به عنوان مثال، محرومیت زنان از مالکیت زمین نه تنها آن‌ها را از نظر اقتصادی وابسته به مردان می‌کند، بلکه قدرت تصمیم‌گیری آن‌ها در خانواده و جامعه را نیز کاهش می‌دهد. در این راستا نتایج پژوهش مطالعه فکوهی (Fakuhi, 2005) محرومیت‌های تاریخی زنان روستایی باعث شده است آن‌ها نتوانند به طور مستقل در فعالیت‌های اقتصادی مشارکت کنند و از فرصت‌های توسعه بی‌بهره بمانند. این شرایط، چرخه فقر و نابرابری را در میان زنان روستایی تداوم می‌بخشد و نیازمند تبعیض مثبت برای جبران عقب‌ماندگی‌های پیشین است.

اجرای ضعیف قوانین و سیاست‌های حمایتی نیز به تشدید نابرابری‌های جنسیتی در مناطق روستایی کمک کرده است. قوانینی که به ظاهر برای حمایت از زنان طراحی شده‌اند، اغلب به دلیل نبود نظارت کافی یا مقاومت‌های محلی به درستی اجرا نمی‌شوند. این ضعف در اجرا، دسترسی زنان به منابع کلیدی مانند آب، زمین و فناوری‌های نوین را محدود می‌کند. در این راستا یافته‌های مطالعه رامان (Raman, 2025) تاکید دارد دسترسی نابرابر به فناوری‌های نوین کشاورزی، زنان روستایی را در موقعیت ضعیف‌تری قرار می‌دهد و توانایی آن‌ها برای بهبود وضعیت اقتصادی خود را کاهش می‌دهد. این محدودیت‌ها نه تنها بر زندگی اقتصادی زنان تأثیر می‌گذارد، بلکه مشارکت آن‌ها در تصمیم‌گیری‌های اجتماعی و سیاسی را نیز تحت الشعاع قرار می‌دهد.

علاوه بر این، تبعیض نظام‌مند در دسترسی به شبکه‌های ارتباطی و اطلاعات کشاورزی، به تشدید نابرابری‌های جنسیتی دامن زده است. زنان روستایی اغلب از آخرین اطلاعات و فناوری‌های مرتبط با کشاورزی و مدیریت منابع محروم هستند، که این امر بهره‌وری آن‌ها را کاهش می‌دهد. این محرومیت‌ها باعث می‌شود زنان نتوانند به طور مؤثر در بازارهای محلی و فرامحلی مشارکت کنند و از مزایای اقتصادی آن بهره‌مند شوند. برای شکستن این چرخه نابرابری، نیاز به اصلاحات ساختاری، تقویت قوانین حمایتی، و افزایش آگاهی در مورد حقوق زنان است. تنها با رفع این موانع تاریخی و نهادینه شده، می‌توان به توانمندسازی واقعی زنان روستایی و بهبود وضعیت اقتصادی و اجتماعی آن‌ها دست یافت.

زمینه‌های ناعادلانه‌ی تبعیض‌های جنسی-جنسیتی

سلطه‌ی مردانه برای اکثر زنان روستایی که در خانواده‌هایی با سرپرست مرد زندگی و کشاورزی می‌کنند، یک تجربه‌ی رایج به شمار می‌رود، با این حال مدیریت مشترک زمین‌ها، محصولات کشاورزی، دامی و به طور کلی نقش‌آفرینی قابل توجه زنان روستایی در کنار مردان روستایی در امور روزمره یک امر طبیعی محسوب می‌شود (Tanellari, Kostandini, Bonabana-Wabbi & Murray, 2014). علی‌رغم حضور پررنگ زنان روستایی محدودیت و تبعیض‌های جنسیت‌بنیان آشکاری وجود دارد که باعث کاهش بروز و بهره‌مندی زنان در زمینه‌های زیادی نظیر اقتصادی، اجتماعی و غیره شده است، چرا که آن‌ها در تصمیم‌گیری‌ها دخالت داده نمی‌شوند. برای توانمندسازی زنان و همچنین به چالش کشیدن سلطه سنتی مردان باید یک استراتژی جامع اجرا شود. به طور مثال باید توجه ویژه‌ای به زنان ساکن در مناطق روستایی شود تا وابستگی آن‌ها از طریق آموزش و فعالیت‌های درآمدزا کاهش یابد (Quisumbing & Pandolfelli, 2010).

تبعیض‌های جنسی-جنسیتی در دسترسی به آموزش باکیفیت، خدمات بهداشتی، و مشارکت در نیروی کار، از جمله موانع اصلی توانمندسازی زنان روستایی است. کمبود مراکز آموزشی دخترانه در مناطق روستایی و سطح نامطلوب برنامه‌های آموزشی ویژه زنان، از جمله چالش‌هایی است که زنان روستایی با آن مواجه هستند. اقدسی و زینال فام (Aghdasi & Zeinal Fam, 2012) در مطالعه‌ای نشان دادند که کمبود مراکز آموزشی دخترانه در مناطق روستایی باعث افزایش نرخ ترک تحصیل دختران و کاهش فرصت‌های شغلی آن‌ها می‌شود. همچنین، کمبود خدمات بهداشتی ویژه زنان و مشکلات تأمین بودجه در مراکز درمانی، به نابرابری‌های جنسیتی دامن می‌زند. ایزانگولا (Isangula, 2012) نیز اشاره کرد که عدم دسترسی زنان روستایی به خدمات بهداشتی مناسب، نه تنها سلامت آن‌ها را به خطر می‌اندازد، بلکه توانایی آن‌ها برای مشارکت فعال در فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی را کاهش می‌دهد.

بسترهای تحول‌آفرین

بسترهای تحول‌آفرین مانند افزایش دسترسی زنان به فرصت‌های استقلال مالی، توسعه شبکه‌های حمایتی و رشد برنامه‌های توانمندسازی، می‌تواند به توانمندسازی زنان روستایی کمک کند. قوش و قوش (Ghosh & Ghosh, 2024) در پژوهش خود نشان دادند که ایجاد شبکه‌های حمایتی برای زنان روستایی، نه‌تنها به افزایش اعتماد به نفس آن‌ها کمک می‌کند، بلکه فرصت‌های جدیدی برای مشارکت در فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی فراهم می‌کند. همچنین، افزایش مشارکت زنان در تصمیم‌گیری‌های محلی و فرامحلی و توسعه تشکل‌های زنان روستایی، از جمله عوامل تحول‌آفرین در این زمینه است. پشتیبانی مالی از زنان از طریق وام‌ها و تسهیلات کم بهره نیز می‌تواند به بهبود وضعیت اقتصادی آن‌ها کمک کند. مکموزی و همکاران (Mukamwezi, Ocan & Akena Adyanga, 2024) تأکید کردند که اعطای وام‌های کم بهره به زنان روستایی، نه تنها به آن‌ها کمک می‌کند تا کسب‌وکارهای کوچک خود را راه‌اندازی کنند، بلکه باعث افزایش استقلال مالی آن‌ها می‌شود.

چالش‌ها و موانع توانمندسازی زنان روستایی

زنان همواره با مسائل و مشکلاتی فراتر از موانع معمول زندگی روبه‌رو بوده و هستند. مسائلی که با چالش‌های روز هم‌افزایی پیدا می‌کنند. مشکلاتی برخواسته از تبعیض جنسیتی که ممکن است در شرایط سخت پس‌زمینه (نرخ بی‌سوادی بالاتر، کمبود مواد غذایی و مصرف کالری و شرایط بهداشتی ضعیف) ذاتی باشد، دسترسی محدود به منابع مالی و فیزیکی، سنت‌ها، سیستم‌های اجتماعی و مردسالاری می‌تواند میزان آسیب‌پذیری و تحت فشار بودن زنان را بالا ببرد. اما آنان از اهمیت و اثرگذاری قابل توجهی برخوردارند علی‌الخصوص در کشورهای توسعه‌نیافته و در حال توسعه که زنان وظایف متعددی مانند تهیه و فراهم‌سازی غذا، آب، جمع‌آوری سوخت و مراقبت از اعضا خانواده را برعهده دارند و ارزش‌های مذهبی و فرهنگی و تربیت، تأثیر عمیقی بر نقش زنان در جامعه دارد.

چالش‌ها و موانع روانشناختی

به‌طور کلی عوامل روانشناختی نظیر اعتماد به نفس و خودکارآمدی به معنای باور به توانایی‌های ذاتی و نقاط قوت فردی که موجب به‌کار بستن اراده و پشتکار در جهت فائق آمدن بر موانع موجود، در راه رسیدن به هدف است، در کنار عوامل مهم دیگری مانند عزت نفس و آزادی عمل، سبب استقلال در تصمیم‌گیری و اختیار برای زنان می‌شود و همچنین از پایه‌های قدرت و توانمندی به‌شمار می‌روند. طبق مطالعات صورت گرفته، چالش‌ها و موانع روانشناختی فراروی زنان روستایی دستاوردهایی از قبیل افزایش سطح سلامت و دانش، پویایی و تحرک، توانایی تجزیه و تحلیل و تصمیم‌گیری و خلاقیت در عمل را به چالش می‌کشد که می‌تواند منجر به انزوای آن‌ها و عقب‌ماندگی جامعه شود (Jejeebhoy & Sathar, 2001).

به‌عنوان مثال یک زن روستایی اگر عزت نفس، باورمندی و خودکارآمدی بالائی نداشته باشد، نمی‌تواند علاوه بر خود و خانواده‌اش، یک جامعه روستایی را در راستای حراست و حفاظت از محیط‌زیست هدایت و مدیریت کند. چراکه زنان مدیر اصلی خانه هستند و می‌توانند مصرف انرژی در خانه را مدیریت و مصارف غیرضروری را کنترل کنند، زباله‌ها را تفکیک کرده و حجم و اثرات سو آن‌ها را کاهش دهند، فضای سبز ایجاد کرده و خانه و محیط خود را با گیاهان و گل‌ها تزئین کنند. همچنین فرزندان خود را در رابطه با حفظ محیط‌زیست و تنوع زیستی آموزش دهند علاوه بر این باتوجه به موضوع مشارکت زنان روستایی در قسمت عمده‌ای از کارهای کشاورزی، آنان می‌توانند در حفاظت از محیط‌زیست تاثیر مستقیمی بگذارند. بنابراین موارد بسیاری از راه حل‌های محیط‌زیستی را می‌توان از خانه شروع کرد اما این هدف زمانی به وقوع می‌پیوندد که زنان به لحاظ روانشناختی و توانمندی از سطح بالایی برخوردار باشند (Ghasemi, Badsar & Falahati, 2022).

چالش‌ها و موانع آموزشی

در مسیر رفع نابرابری‌ها و تبعیض‌های موجود، قربانی در نظر گرفتن زنان باعث می‌شود کنش‌گری و عاملیت آنان انکار شود و آسیب‌پذیری‌شان یک مشکل درونی تلقی شود بنابراین باید چالش‌ها و موانع آموزشی را در دستور کار قرار داد تا زنان به معنای واقعی توانمند شوند. در حالی که باید در تصمیم‌گیری استراتژی‌های مدیریتی و قانون‌گزاری، آموزش زنان در همه سطوح (عمومی و تخصصی) گنجانده شود چراکه مطالعات نشان داده پروژه‌های احیا و حفاظتی که در آن زنان آموزش ببینند و نقش کلیدی داشته باشند، موفقیت‌آمیزتر است. همچنین حضور زنان آموزش‌دیده سبب موفقیت‌های بزرگی در تسهیل درآمدزایی، صرفه‌جویی در دارایی‌ها، تأثیر مثبت بر امنیت غذایی و ایجاد سرمایه اجتماعی شده است. می‌توان گفت یکی از مزایای آموزش زنان استفاده کارآمدتر از منابع در راهبردهای نوآورانه آن‌ها است. آموزش زنان می‌تواند بسته به عواملی مانند طبقه اجتماعی، قومیت و موقعیت خانوادگی متفاوت باشد اما اگر به شکل صحیح اجرا شود می‌تواند منجربه توسعه اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و در نهایت دستیابی به توسعه پایدار شود (Mosedale, 2005; Bayeh, 2016) .

نداشتن مشارکت جامعه

نداشتن مشارکت جامعه در برنامه‌های توانمندسازی زنان روستایی، از جمله چالش‌های اصلی است. مشارکت جامعه در برنامه‌های توانمندسازی زنان، نه تنها به افزایش اثربخشی این برنامه‌ها کمک می‌کند، بلکه باعث ایجاد حس مسئولیت‌پذیری در جامعه می‌شود. هم‌چنین بی‌توجهی به برنامه‌های ترویجی ویژه زنان و نگرش منفی نسبت به آموزش‌ها، باعث کاهش مشارکت جامعه در این برنامه‌ها شده است. به علاوه، کمبود انگیزه برای مشارکت جوامع محلی و فقدان فرهنگ مشارکت در فعالیت‌های محیط‌زیستی، از دیگر موانع مشارکت جامعه است.

بوسراپ[1] در سال ۱۹۷۰ در کتاب خود که یکی از کتاب‌های پیشگام حوزه مطالعات زنان و توسعه بود، بر لزوم سیاست‌گذاری برای تقویت مشارکت زنان در توسعه تاکید کرد. سپس اولین کنفرانس جهانی زنان در سال ۱۹۷۵ در مکزیکوسیتی سازمان‌دهی شد و موجب بسط گفتمان نقش‌آفرینی زنان در توسعه شد. استدلال بوسراپ مبنی بر اینکه نامرئی بودن سهم زنان در اقتصاد منجر به عدم تعادل در سیاست‌های توسعه می‌شود، منجر به حمایت قوی برای مشارکت‌های اقتصادی زنان شد که تا به امروز ادامه دارد. با این وجود رابطه ناعادلانه‌ی بین نظام‌های سرمایه‌داری جهانی و ارزش‌گذاری فعالیت‌های زنان لزوم بیش از پیش توانمندسازی زنان در بخش‌های رسمی و غیررسمی را نشان می‌دهد (Richardson, 2018).

در کنفرانس مکزیکوسیتی[2] در سال ۱۹۷۵ مشارکت زنان بیشتر معطوف به بخش‌های غیررسمی و کار خانگی دیده شده بود. اما در دهه بعدی که بین کنفرانس کپنهاگ[3] در سال ۱۹۸۵ و سومین کنفرانس سازمان ملل متحد در پکن[4] در سال ۱۹۹۵ قرار گرفت، بینش جهانی نسبت به جایگاه زنان در تحقق توسعه همه‌جانبه تعالی یافت. محققان شروع به معطوف کردن توجه به نابرابری‌های جنسیتی و تاثیر آن بر پویایی قدرت کردند و در ادامه تحقیقات حمایت شده توسط برنامه بنیاد راکفلر در مورد وضعیت زنان منجر به سرمایه‌گذاری بیشتر در ارائه و مطالعه شاخص‌های قابل مقایسه بین‌المللی وضعیت زنان شد که در سال های بعد هسته اصلی سوالات مربوط به جنسیت را تشکیل دادند (Kishor & Subaiya, 2005).

1-Boserup
2- Mexico City Conference in 1975
3- Copenhagen Conference in 1985
4- The Third United Nations Conference in Beijing in 1995

چالش‌ها و موانع اقتصادی

چالش‌های اقتصادی مانند کمبود بودجه برای تأمین منابع مالی لازم جهت توانمندسازی زنان روستایی، از جمله موانع اصلی توسعه پایدار روستایی از طریق توانمندسازی زنان است. همچنین، کمبود حمایت مالی از سازمان‌های دولتی و غیردولتی حامی زنان، به تشدید این چالش دامن زده است.

چوتا (Chuta, 2017) معتقد است که منابع و چالش‌ها و موانع اقتصادی، بر قدرت چانه‌زنی زنان تأثیر زیادی دارد. هم‌چنین او تاکید دارد از آن جا که زنان به عنوان افراد وابسته تعریف می‌شوند، طیفی از رفتارهای نامناسب و چالش‌ها و موانع اقتصادی به آنان «روا» تلقی می‌شود. در این وضعیت زنان باید به معنای واقعی با «هنجارها»[1] و «کلیشه‌های اجتماعی»[2] چانه بزنند.

بررسی ادبیات نشان می‌دهد زنان بیوه و جداشده درگیر انواع چالش‌ها و موانع اقتصادی با همسران سابق، خویشاوندان، والدین و فرزندانشان هستند و این روابط بر توانایی آن‌ها در دسترسی به منابع، ابراز عاملیت فردی و امکانات آن‌ها بر توانمندشدن تأثیر زیادی دارد. بنابراین، زنان سرپرست خانوار با مجموعه‌ای از مشکلات اقتصادی مواجه‌اند (Badstue, Petesch, Farnworth, Roeven, & Hailemariam, 2020). علاوه برآن با تکیه بر نظر چوتا (۲۰۱۷) هنجارهای فرهنگی و معادلات اجتماعی را نیز باید به این مشکلات افزود.

مطالعات نشان می‌دهد، تقویت حقوق و وضعیت اقتصادی زنان در توانمندسازی آنان اثر قابل توجهی دارد، به عنوان مثال حدود ۴۰ درصد از نیروی کار روستاها را زنان تشکیل می‌دهند و در نیمی از تولید غذای جهان سهیم هستند، اما با موانع بیشتری نسبت به مردان برای دستیابی به منابعی مانند زمین، اعتبار و نهاده‌ها و خدمات کشاورزی مواجه هستند. همچنین تغییر شرایط محیطی مانند تغییرات آب و هوایی، بلایای طبیعی و غیره که منجربه تخریب محیط‌زیست می‌شود، نابرابری‌ها را تشدید می‌کند (Md, Gomes, Dias & Cerdà, 2022).

محدودیت‌های قانونی

محدودیت‌های قانونی مانند فرآیند پیچیده اخذ مجوز برای برنامه‌های توانمندسازی زنان روستایی، از جمله موانع اصلی است. فرآیند پیچیده اخذ مجوز برای برنامه‌های توانمندسازی زنان، باعث کاهش مشارکت آن‌ها در فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی می‌شود. قوانین محدودکننده مشارکت زنان در فرآیندهای برنامه‌ریزی توسعه روستایی و عدم اجرای کامل قوانین حمایت‌کننده از زنان، از دیگر محدودیت‌های قانونی است که زنان روستایی با آن مواجه هستند. بنابراین ساده‌سازی فرآیندهای قانونی و افزایش نظارت بر اجرای قوانین حمایت‌کننده از زنان، می‌تواند به توانمندسازی آن‌ها کمک کند.

حمایت رسمی قانونی از برابری جنسیتی در سراسر جهان در دهه‌های گذشته به شدت افزایش یافته و همچنان توانمندسازی زنان روستایی از اولویت‌های نظام برنامه‌ریزی در تمام مقیاس‌های محلی تا بین‌المللی است. علی‌رغم تحقیقات گسترده در مورد نابرابری‌های مبتنی بر جنسیت در شاخص‌های قابل اندازه‌گیری مانند پیشرفت تحصیلی، نرخ اشتغال و وضعیت سلامت، تمرکز بر این معیارهای عینی در بحث‌ها بعضا باعث کمرنگ شدن اهمیت این نشانگرها، برای خود زنان می‌شود. در طول دو دهه گذشته، لزوم توجه به محدودیت‌های قانونی توانمندسازی زنان در گفتمان توسعه بین‌المللی آمیخته و ترویج شده است. حتی امروزه این آرمان به عنوان یکی از تعهدات برجسته جهانی در هدف پنجم توسعه پایدار (SDG-5)، که به دنبال دستیابی به برابری جنسیتی است، انعکاس یافته است (Desai, Chen, Reddy & McLaughlin, 2022).

1- Norms
2- Social stereotypes

محدودیت‌های اجتماعی-فرهنگی

توجه ناکافی به ابعاد اجتماعی و فرهنگی در برنامه‌های توانمندسازی زنان روستایی، از جمله موانع اصلی است. عدم تطبیق محتوای آموزشی با بافت و بستر محلی، باعث کاهش اثربخشی برنامه‌های توانمندسازی زنان روستایی می‌شود. کمبود منابع جدید برای ظرفیت‌آفرینی اجتماعی-فرهنگی، از دیگر محدودیت‌های اجتماعی-فرهنگی است که زنان روستایی با آن مواجه هستند. بنابراین توجه به ابعاد اجتماعی و فرهنگی زنان روستایی در برنامه‌های توسعه، می‌تواند به افزایش مشارکت آن‌ها در فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی کمک کند.

پلم‌وود[1] در سال ۱۹۹۲ با تاکید بر محدودیت‌های اجتماعی-فرهنگی توانمندسازی زنان روستایی برای حفاظت از محیط‌زیست و تسهیل روند توسعه پایدار تاکید کرد طبیعت به‌دلیل ویژگی‌های مشترکش با زنان مانند قدرت باروری و پدیدآوری مبحثی فمنیستی محسوب می‌شود و زنان بواسطه چنین ویژگی‌هایی، نسبت به مردان شناخت و تجربیات کامل‌تری از طبیعت دارند. در بین زنان نیز آن دسته که برای تامین نیازهای خود و بدست آوردن امکانات حداقلی در رنج و تلاش بیشتری هستند مانند زنان روستایی، درک عمیق‌تری در رابطه با طبیعت نسبت به زنان شهرنشین و طبقه متوسط دارند، درکی که اکوفمنیست‌ها آن را ماحصل وابستگی می‌دانند. در کشورهای در حال توسعه، به‌ویژه در روستاها، زنان باتوجه به نقش‌آفرینی قابل توجه‌شان در فراهم آوردن مایحتاج زندگی وابستگی بیشتری به منابع طبیعی و محیط‌زیست دارند و از تخریب آن آسیب بیشتری می‌بینند به‌طور مثال زنانی که به‌جهت تامین علوفه برای دام، سوخت، داروهای گیاهی، غذا و غیره وابسته به پوشش گیاهی منطقه هستند، بعد از تخریب درختان و پوشش گیاهی باید مسافت بیشتری را بپیمایند و علاوه بر تحت فشار بودن خودشان، تهدیدهایی متوجه فرزندان، خانه و هرآنچه که تحت مدیریت و مراقبت زنان است، خواهد بود.

به طور کلی تحقیقات نشان داده رفع محدودیت‌های اجتماعی-فرهنگی از مسیر توانمندسازی زنان روستایی می‌تواند موجب قدرت‌بخشی و توانمندسازی زنان شود. چراکه زنان روستایی در هر مکان و هر قشری که باشند می‌توانند با مفهوم اکوفمنیسم هم‌ذات‌پنداری و همراهی کنند. همچنین اکوفمنیسم از تاثیرگذاری و قدرت بیشتری نسبت به فمنیسم برخوردار است چراکه دو تفکرانتقادی قوی با هم، هم‌افزایی پیدا کرده‌اند. این دیدگاه برآمده از توجه به ساختار و سیستم‌های تبعیض‌آمیز سیاسی، اقتصادی و اجتماعی عصر حاضر که در آن‌ها زنان مورد اجحاف قرار می‌گیرند و مورد نکوهش قرار دادن سلطه‌ی شدید دنیای مردسالار صنعتی بر طبیعت و بهره‌کشی از آن پدید آمده است (Enayat & Fathzadeh, 2009).

محدودیت‌های جنسیت‌بنیان برای کارآفرینی

محدودیت‌های جنسیت‌بنیان مانند موانع اداری و بوروکراسی در راه‌اندازی کسب‌وکارهای زنان روستایی، از جمله چالش‌های اصلی است. موانع اداری و بوروکراسی، باعث کاهش انگیزه زنان روستایی برای راه‌اندازی کسب‌وکارهای کوچک می‌شود. ضعف سیستم‌های نظارتی برای محدودیت‌زدایی از موانع جنسیت‌بنیان و کمبود بودجه برای آموزش مدیران زن، از دیگر موانع کارآفرینی زنان روستایی است. بنابراین ایجاد ساختارهای تشویقی برای بهبود کسب‌وکارهای زنان روستایی، می‌تواند به افزایش مشارکت آن‌ها در فعالیت‌های اقتصادی کمک کند.

راهکارهای توانمندسازی زنان روستایی

با وجود تمام تبعیض‌ها و محدودیت‌ها مانند دسترسی نابرابر به تغذیه، آموزش و مراقبت‌های بهداشتی، فرصت محدود برای کسب درآمد، کنترل کم بر منابع و حقوق قانونی مؤثر محدود، در عین حال زنان در برابر نابرابری‌های جنسیتی منفعل نیستند. به عنوان

1- Plumwood

مثال تحقیقات در زیمبابوه، چانه‌زنی و استراتژی بسیار پیچیده و ظریف توسط زنان در خانواده‌ها برای افزایش سهم مشارکتی‌شان را نشان می‌دهد (Manda & Mvumi, 2010). چنین مشاهداتی این واقعیت را برجسته می‌کند که زنان می‌توانند با قدرت نرم[1] خود تبعیض‌های جنسیتی را از بسیاری جهات دور بزنند و در مسیر خود به سمت توانمندسازی، «مسیرهای پنهان» را طی کنند (O'Brien et al., 2016).

پررنگ‌سازی نقش زنان در فرآیند توسعه پایدار روستایی

پررنگ‌سازی نقش زنان در پروژه‌های محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی، از جمله راهکارهای مؤثر در راستای توسعه پایدار است. مشارکت زنان در پروژه‌های محیط‌زیستی، نه تنها به کاهش هزینه‌های حفاظتی کمک می‌کند، بلکه باعث افزایش آگاهی محیط‌زیستی در جامعه می‌شود. آموزش زنان و دختران برای رهبری پروژه‌های حفاظت محیط‌زیست و ارائه اطلاعات دست اول در زمینه‌های اقتصادی و اجتماعی، می‌تواند به توانمندسازی آن‌ها کمک کند. همچنین، اولویت‌دهی به زنان جهت کسب پست‌های مدیریتی و تقویت مشارکت آن‌ها در تصمیم‌گیری‌های محلی، از دیگر راهکارهای مؤثر است. بنابراین افزایش مشارکت زنان در تصمیم‌گیری‌های محلی، می‌تواند به بهبود وضعیت اقتصادی و اجتماعی آن‌ها کمک کند (Akbari, 2012).

افزایش دسترسی به زیست بوم خلاقیت، نوآوری و تکنولوژی‌های نوین

ارائه آموزش‌های آنلاین و مجازی به زنان و دختران روستایی، از جمله راهکارهای مؤثر در راستای افزایش دسترسی به زیست بوم خلاقیت، نوآوری و تکنولوژی‌های نوین است. آموزش‌های آنلاین، نه تنها دسترسی زنان روستایی به منابع آموزشی را افزایش می‌دهد، بلکه باعث کاهش هزینه‌های آموزشی می‌شود. بهبود دسترسی به اینترنت پرسرعت و کامپیوتر و ارتقا مهارت زنان در استفاده از ابزارهای آنلاین، می‌تواند به توانمندسازی آن‌ها کمک کند. همچنین، توسعه زیرساخت‌های فناوری در مدارس دخترانه روستایی و رفع محدودیت‌های اداری، از دیگر راهکارهای مؤثر است. بنابراین توسعه زیرساخت‌های فناوری در مناطق روستایی، می‌تواند به افزایش دسترسی زنان به منابع آموزشی و اقتصادی کمک کند (Abbasi, Fallah & Akbari Kajani, 2023).

برخورد همگن با مسائل زنان

برخورد همگن با مسائل زنان در سطوح محلی تا ملی، از جمله راهکارهای مؤثر در راستای تحقق پایداری است. افزایش بودجه و هماهنگ‌سازی برنامه‌های آموزش و توانمندسازی زنان روستایی، می‌تواند به بهبود وضعیت آن‌ها کمک کند. همچنین، تدوین یک برنامه ملی هماهنگ برای آموزش محیط‌زیستی به زنان روستایی، از دیگر راهکارهای مؤثر است. بنابراین هماهنگی بین مناطق و استان‌ها برای اجرای برنامه‌های حفاظتی با رهبری زنان روستایی، می‌تواند به افزایش اثربخشی این برنامه‌ها کمک کند.

یکی از مسائلی که شاید به اندازه کافی بررسی و یا تجزیه و تحلیل نشده است، سن زنان در هنگام ازدواج و تاثیر آن بر ظرفیت تصمیم‌گیری فعلی و آتی آن‌ها است. تعداد زیادی از زنان در دوران کودکی یا نوجوانی، علی‌رغم منع قانونی، در کشورهای در حال توسعه ازدواج می‌کنند و این مسئله زمینه را جهت بروز سلطه‌ی مردانه در خانواده‌ی آن‌ها بیش از سایر همتایان فراهم می‌آورد (John, Edmeades, Murithi & Barre, 2019). چوتا (Chuta, 2017) اشاره می‌کند برخی دختران جوان به سبب شرایط خاص اجتماعی یا خانوادگی مجبور می‌شوند قبل از دست‌یابی به سطح بالای تحصیلات و استقلال اقتصادی، همسر و مادر شوند که این آسیب‌هایی را در پی دارد. به عنوان مثال او استدلال می‌کند که ازدواج زودهنگام به طور مستقیم و معناداری به کاهش قدرت چانه‌زنی شخصی آن‌ها منتج می‌شود.

1- Soft Power

راهکارهای سیاستی برای توانمندسازی زنان

ارائه الگوها و نمونه‌های موفق برای توانمندسازی زنان روستایی، از جمله راهکارهای مؤثر است. برجسته‌سازی نمونه‌های عملی و موفق نقش‌آفرینی زنان در توسعه روستایی، می‌تواند به الگوسازی مناسب کمک کند. همچنین، ایجاد سیستم‌های حمایتی برای زنان موفق دارای محدودیت‌های جسمی، از دیگر راهکارهای مؤثر است. بنابراین ارائه الگوهای موفق به زنان روستایی، می‌تواند به افزایش انگیزه و مشارکت آن‌ها در فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی کمک کند (Zafari-Nasab, Golzari, Noorian & Razavi, 2022).

سازمان حقوق بین‌الملل توسعه[1] در سال ۲۰۱۳ در سطحی کلان، رویکردی قانونی را نسبت به توانمندسازی ارئه داده است که طی آن طراحی راهبردهای حقوقی بسترمحور را در خصوص دستیابی به عدالت جنسیتی، به‌واسطه توانمندسازی حقوقی زنان اثربخش معرفی می‌کند. در این راستا رابطه زمینه رسمی و غیررسمی را بررسی کرده‌اند و موفقیت این راهبرد توانمندسازی را در گرو تکمیل آن با تلاش جهت شناسایی موانع و قوانین تبعیض‌آمیز موجود در سیستم رسمی می‌یابد. این طرح رویکردی چند رشته‌ای برای دسترسی زنان به عدالت اتخاذ می‌کند و پتانسیل مشارکت با ارائه‌دهندگان خدمات غیر حقوقی، به‌ویژه آن‌هایی که در زمینه توانمندسازی اقتصادی زنان و تولید درآمد، حفاظت از خشونت و امنیت غذایی کار می‌کنند، را بررسی می‌کند. از نظر آن‌ها بهترین شیوه‌ها شامل همکاری ارائه‌دهندگان کمک حقوقی با ارائه‌دهندگان خدمات غیرحقوقی است، مانند ترکیب با مشاوره خشونت خانگی در پناهگاه‌های زنان، یا ارائه کمک‌های حقوقی همراه با خدمات موجود که اغلب زنان به آن دسترسی دارند، مانند خدمات مامایی یا طرح‌های اعتبار خرد (Jahad-e-Daneshgahi Women's Think Tank, 2024).

الگوسازی و ارائه الگوهای مناسب

اصطلاح اکوفمینیسم توسط فمینیست فرانسوی فرانسوا دئوبون[2] در سال ۱۹۷۴ برای نشان دادن پتانسیل زنان برای برانگیختن یک انقلاب محیط‌زیستی که مستلزم روابط جدید بین زنان و مردان و بین مردم و طبیعت به نام تضمین بقای انسان است، ابداع شد (Merchant, 1981). این مفهوم‌پردازی نشان از پتانسیل تبدیل شدن به الگوهای تحول دارد.

منطق اکوفمینیسم همچنین استدلال می‌کند نبرد برای بقای بوم شناختی ذاتاً با مبارزات برای آزادی زنان و سایر اشکال عدالت اجتماعی در هم تنیده است. اکثر نظریه‌پردازان اکوفمنیستی بر سه محور اتفاق نظر دارند: ۱. تعامل نزدیک زنان با طبیعت ۲. ارتباط میان تحت سلطه بودن زن و طبیعت ۳. ایفای نقش زنان در حل مسائل بوم‌شناختی. ماحصل پیوند نگرش‌های فمنیستی و مفاهیم بوم‌شناختی ایجاد واقعیتی بسیط‌تر از جنبش‌های زنانه با درون‌مایه جنسیتیِ صرف است. این واقعیت با نگاهی کلی‌تر رابطه انسان را فارغ از جنسیت با طبیعت بررسی می‌کند. همچنین به وارسی نقش مرد و زن در طبیعت و اقدام‌های مردسالارانه‌ی منتج به استضعاف و استعمار زنان و طبیعت می‌پردازد که بر الگوسازی و ارائه الگوهای مناسب برای زنان در مسیر خودشکوفایی و تاثیرگذاری اجتماعی دارد (Boroumand & Tabatabaei Yazdi, 2019).

اکوفمنیسم نه تنها مبتنی بر شناخت ارتباطات بین استثمار طبیعت و ستم بر زنان در جوامع مردسالار است، بلکه بر پیوند بین این دو شکل از سلطه با هم و با استثمار طبقاتی، نژادپرستی، استعمار و استعمار نو نیز تأکید دارد. ارتباط متعارف زنان با جهان طبیعی، که ارتباطی تاریخی و کهن به شمار می‌رود، توسط اکوفمینیست‌ها، تمجید می‌شود. به قول کاتریونا ساندیلندز[3]، کسانی که آنچه او به طور جزئی «محیط‌زیست‌گرایی مادرانه»[4] می‌نامد ترویج می‌کنند، زنان را - به‌عنوان حاملان کودکان و نگهبانان قداست خانوادگی در کنار نگهبانان زمین و حافظان محیط‌زیست می‌ستایند. آن‌ها معتقدند این زنان هستند که جامعه را «سبز» می‌کنند و محیط را بهبود می‌بخشند (Buell, Heise & Thornber, 2011).

1- International Development Law Organization
2- Françoise d'Eaubonne
3- Catriona Sandilands
4- Motherhood environmentalism

اثرات و فواید توانمندسازی زنان روستایی

تثبیت مالکیت، قدرت و زمینه‌های نقش‌آفرینی زنان

رسوم و باورهای غلط از دیرباز موجب محدودیت، کم‌رنگ شدن و به حاشیه رانده شدن زنان شده است. در دهه‌های اخیر با پیشرفت شهرنشینی و مدرنیته توجه بیشتری به جایگاه زن و نقش‌آفرینی آن شده است اما همچنان ظرفیت‌ها و مشارکت زنان روستایی، به ویژه در کشورهای در حال توسعه مغفول واقع شده است. این در حالی است که زنان روستایی بواسطه مدیریت خانه و خانواده، مشارکت در کارهای کشاورزی، دام‌پروری، باغداری، صنایع دستی، تامین مایحتاج اولیه خانه و پرورش فرزندان نقش بسیار حیاتی و پررنگی را برعهده دارند. یکی از اثرات و فواید توانمندسازی زنان روستایی تثبیت مالکیت، قدرت و زمینه‌های نقش‌آفرینی آنان است. لذا سوانح طبیعی، محدودیت‌های روستا، تنگناهای جنسیت‌بنیان و سایر عواملی که در تمام سالیان باعث سرکوب زنان روستایی و عدم بهره‌مندی آنان از حقوقی نظیر تحصیل، مالکیت، استقلال اقتصادی و اجتماعی و غیره شده است با تثبیت مالکیت، قدرت و زمینه‌های نقش‌آفرینی زنان زمینه تقویت و بالندگی آن‌ها را فراهم آورد.

حفاظت پایدار محیط‌زیست با نقش‌آفرینی زنان

زنان به‌واسطه‌ی ویژگی پدیدآوری‌شان، نزدیکی و همذات‌پنداری ملموسی با طبیعت دارند که هم‌افزایی این موضوع با آموزش دیدن آنان، می‌تواند تبدیل به فرصتی برای توسعه حفاظت پایدار محیط‌زیست شود (Lahijanian & Vaskoui, 2016). طبق مطالعات حدود ۳۰ درصد از جمعیت کشور را روستائیان و نیمی از این جمعیت را زنان تشکیل می‌دهند (Tarasi, Karimzadeh & Aghayari-Heer, 2019). حراست و حفاظت از محیط‌زیست اگرچه در حوزه مسئولیت‌های دولت واقع شده اما طبق اصل ۵۰ قانون اساسی، وظیفه مردم نیز محسوب می‌شود و بدون آگاهی و وقوف امکان‌پذیر نخواهد بود. روستائیان با توجه به وابستگی و نزدیکی بیشتر به محیط‌زیست، اثرگذاری بیشتری در این حوزه خواهند داشت و با توجه به مطالعات انجام شده، آنان توجه و علاقه‌ی ویژه‌ای به تعامل و حفاظت آگاهانه از محیط‌زیست از طریق شرکت در کلاس‌های آموزشی، عضویت در انجمن‌های محیط‌زیستی و مشارکت در فعالیت‌های این حوزه نشان دادند (Riahi, Javan & Dehghani, 2016). بنابراین دستیابی به توسعه پایدار و حفاظت محیط‌زیست با نقش‌آفرینی زنان روستایی بسیار آرمان دستیافتنی‌تر است.

رشد پایدار اقتصادی و توسعه اجتماعی با نقش‌آفرینی زنان

اغلب کشورها از توانمندسازی زنان به‌عنوان راه حلی طلایی و سرمایه‌گذاری برای دستیابی به توسعه پایدار جوامع خود یاد می‌کنند و یکی از راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار، توجه به موضوع حفاظت از محیط‌زیست است. دافلو[1] در سال ۲۰۱۲ ارتباط میان توانمندسازی زنان و توسعه را یک رابطه دوسویه می‌دانست، بدین صورت که توانمندسازی زنان منجربه توسعه می‌شود و توسعه بستر توانمندسازی زنان را فراهم می‌کند. همچنین از طریق تامین مالی خرد که نوعی وام کم بهره است، می‌توان زنان را قادر به راه اندازی دامداری، باغداری، خیاطی یا هر تجارت خانگی و مستقل دیگری کرد. این راه حلی است که می‌تواند نابرابری‌های اقتصادی بین زن و مرد را کاهش دهد و استقلال اقتصادی زنان را افزایش دهد. امور مالی در حفظ رشد اقتصادی و کاهش فقر نقش مهمی ایفا می‌کند. وام‌های خرد زنان را قادر می‌سازد تا خود را آموزش دهند و درآمد خود را به دست آورند که این امر به توانمندسازی آن‌ها کمک می‌کند (Akter, Naeem & Didar, 2021).

1- Duflo

نتیجه‌گیری

از میان شرایطی که برای زنان روستایی وجود دارد، می‌توان از برخی از آن‌ها به‌عنوان زمینه‌ی ایجاد توسعه، پایداری و بهبود شرایط زنان بهره برد. به‌عنوان مثال از توجه به سرشت زاینده و مولد زنان و قرینگی این ویژگی با طبیعت می‌توان به تعامل با طبیعت و درک قوی زنان از آن رسید. هم‌افزایی این ویژگی با استعمار زنان و طبیعت توسط مردان، باعث ایجاد انگیزه زنان در جهت کارآمدی و بهبود شرایط خود و طبیعت می‌شود. از این رو می‌توان در پروژه‌های توسعه و حفاظت از طبیعت به نقش‌آفرینی موثر زنان باور داشت. نکته قابل توجه برای دست‌یابی به این مهم، آماده‌سازی زنان از طریق آموزش محیط‌زیست و توانمندسازی آنان است.

در نتایج پروژه‌های مشارکت، استفاده از جوامع به حاشیه رانده شده مانند زنان روستایی، سطح بالایی از تعهد، اشتیاق، مسئولیت‌پذیری و در نهایت ایجاد منفعت برای جامعه به چشم می‌خورد. این مشارکت فعال و پویا در پی بدست آوردن استقلال فردی، اقتصادی و اجتماعی زنان رقم می‌خورد که برآمده از آموزش دیدن و مهارت‌افزایی آنان است. در واقع زنان پس از بدست آوردن امنیت و استقلال مالی به سطحی از اعتماد به نفس، باورمندی و توانایی می‌رسند که به دنبال آن نقش‌آفرینی و مشارکت فعال در جامعه را رقم می‌زنند. آموزش می‌تواند به دیدگاه، نظریات، اولویت‌ها و به‌کاربستن تجربیات زنان روستایی جهت و هدف ببخشد و آنان را در مسیر حفاظت پایدار محیط‌زیست قرار دهد. در این راه عوامل متعددی برای تسهیل دست‌یابی به این هدف وجود دارد که به ذکر چند مورد از آنان پرداخته می‌شود:

۱. ایجاد عدالت و شکستن کلیشه‌های جنسیتی جهت دست‌یابی به امکانات و استقلال اجتماعی
۲. فراهم آوردن زمینه‌ی تحصیل، آموزش و مهارت‌اندوزی
۳. ایجاد اشتغال و بسترهای درآمدزایی جهت دست‌یابی به استقلال اقتصادی
٤. به رسمیت شناختن نقش زنان در فرآیندهای تولیدی و پرداخت حقوق مسلم آن‌ها
٥. مشارکت دادن و درنظر گرفتن حق رای و نظر زنان در فرآیندهای تصمیم‌گیری، سیاست‌گذاری و قانون‌گذاری

به طور کلی از پژوهش حاضر می‌توان نتیجه گرفت توسعه پایدار و حفاظت اثربخش محیط‌زیست می‌تواند از مشارکت فعال و پررنگ زنان روستایی تاثیرات مثبت و قابل توجهی بپذیرد. مشارکت موردنظر ماحصل فرآیند توانمندسازی و مهارت‌افزایی زنان است. آموزش محیط‌زیست علاوه بر افزایش توانمندی‌های زنان، می‌تواند نقش مهمی در ایجاد رویکرد اصولی در آنان و هدایت ظرفیت‌های جدید در راه دست‌یابی به توسعه پایدار و حفاظت اثربخش محیط‌زیست ایفا کند. همچنین حفاظت پایدار در کنار توسعه، موجب توجه بیشتر و ایجاد زمینه‌های بهتر برای پرداختن به موضوع محیط‌زیست و راه‌های ترویج و آموزش آن شود. در واقع چهار عامل آموزش، توانمندسازی، مشارکت و حفاظت به صورت زنجیره‌ای در یک چرخه قرار می‌گیرند، بر هم اثر می‌گذارند و از هم اثر می‌پذیرند.

References

Abbasi, R., Fallah, M. R., & Akbari Kajani, A. (2023). Identifying the Antecedents of Value Creation of Basij Sazandegi Organization in the Development of Home. *Endowment and Charity Studies*, *1*(2), 265-288. [In Persian] https://doi.org/10.22108/ecs.2023.138413.1059

Aghdasi, A. N., & Zeinal Fam, A. (2012). A study of the effective social and environmental factors on female high-school students' drop-out in Miandoab Township in 2010-2011. *Education and Evaluation (Educational Sciences)*, *5*(17), 113-130. [In Persian] https://sanad.iau.ir/Journal/jinev/Article/972733

Akbari, H. (2012). The Role of Women in Sustainable Development of the Environment. *Women in Development and Politics*, *10*(4), 27-56. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jwdp.2013.30574

Akter, M. F., Naeem, A., & Didar, A. H. (2021). Relating women's empowerment to microfinance in a small village in Bangladesh by using statistical methodology. *South Asian Journal of Social Studies and Economics*, *9*(4), 19-27. https://doi.org/10.9734/sajsse/2021/v9i430248

Alemayehu, M., & Meskele, M. (2017). Health care decision making autonomy of women from rural districts of Southern Ethiopia: a community based cross-sectional study. *International Journal of Women's Health*, 213-221. https://doi.org/10.2147/ijwh.s131139

Azimi, N., Alibeigi, A., & Papzan, A., (2023). Assessing rural women's empowerment in Kermanshah Township. *Human Geography Research*, *55* (2), 119-134. [In Persian] 10.22059/JHGR.2022.326304.1008332

Badstue, L., Petesch, P., Farnworth, C. R., Roeven, L., & Hailemariam, M. (2020). Women farmers and agricultural innovation: Marital status and normative expectations in rural Ethiopia. *Sustainability*, *12*(23), 9847. https://doi.org/10.3390/su12239847

Bayeh, E. (2016). The role of empowering women and achieving gender equality to the sustainable development of Ethiopia. *Pacific Science Review B: Humanities and Social Sciences*, *2*(1), 37-42. https://doi.org/10.1016/j.psrb.2016.09.013

Boroumand, A. A., & Tabatabaei Yazdi, F. (2019). The place of women in the development of sustainable ecotourism, Paper presented at the Proceedings of the National Conference of Women and Rural Tourism Development. 357-350. [In Persian] https://civilica.com/doc/979033/

Botkin, D., & Keller, E. (2015). *Environmental Science Earth As living planet*. In A., Vahabzadeh (eds.), Mashhad: Mashhad Jahad-e-Daneshgahi Publications. [In Persian] https://www.jdmpress.com/books/67-

Buell, L., Heise, U. K., & Thornber, K. (2011). Literature and environment. *Annual Review of Environment and Resources*, *36*, 417-440. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-111109-144855

Chuta, N. (2017). Young women's household bargaining power in marriage and parenthood in Ethiopia. Young Lives(Vol. 166). https://www.younglives-ethiopia.org/sites/default/files/syndicated/YL-WP166-Chuta%2520%25282%2529_0.pdf

Desai, S., Chen, F., Reddy, S., & McLaughlin, A. (2022). Measuring Women's Empowerment in the Global South. *Annual Review of Sociology*, *48*, 507-527. https://doi.org/10.1146/annurev-soc-030420-015018

Enayat, H., & Fathzadeh, H. (2009). A theoretical approach to the concept of ecofeminism. *Sociological Studies*, *5*(2), 45-63. [In Persian]

Fakuhi, N. (2005). Positive Discrimination as a Mechanism against Deprivation. *Women in Development and Politics*, *3*(3), 115-141. [In Persian] https://jwdp.ut.ac.ir/article_19201.html

Ghasemi, M., Badsar, M., & Falahati, L. (2022). Investigating the Role of Psychological Variables on the Rural Women's Empowerment in Environmental Conservation. *Environmental Research*, *13*(26), 335-354. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089597.1401.13.26.19.2

Ghosh, A., & Ghosh, A. (2024). Empowering Rural Women in India: Self-help groups as catalysts for development. *Futuristic Trends in Social Sciences*, *3*, 1-16. https://doi.org/10.58532/v3baso27p1ch1

Isangula, K. G. (2012). Improving Women and Family's Health through Integrated Microfinance, Health Education and Promotion in Rural Areas. *Journal of Sustainable Development*, *5*(5), 76. https://doi.org/10.5539/JSD.V5N5P76

Izadi, H., Khosravipour, B., & Savari Mombani, A. (2012). Explaining the factors affecting the increase in rural women's willingness to protect the environment (Case study: Hassanabad village, Khorramabad). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *11*(2), 175-192. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.72699.1113

Jafari, A., Parvarinejad, Gh., & Khalilnejadi, S. (2013). The effects of technical and vocational education organization's skill trainings on the establishment of rural women's home businesses (case: Damghan city). *Spatial Economics and Rural Development*, *12*(44), 45-62. [In Persian] https://doi.org/20.1001.1.23222131.1402.12.44.2.2

Jahad-e-Daneshgahi Women's Think Tank. (2024). Examples of Women's Empowerment Projects in Iran and the World (Part One). Published in 12 May 1403, Jahad-e-Daneshgahi Al-Zahra Branch. [In Persian] Online access: https://alzahra.acecr.ac.ir/fa/news/71233

Jejeebhoy, S. J., & Sathar, Z. A. (2001). Women's autonomy in India and Pakistan: the influence of religion and region. *Population and Development Review*, *27*(4), 687-712. https://doi.org/10.1111/j.1728-4457.2001.00687.x

John, N. A., Edmeades, J., Murithi, L., & Barre, I. (2019). Child marriage and relationship quality in Ethiopia. *Culture, Health & Sexuality*, *21*(8), 853-866. https://doi.org/10.1080/13691058.2018.1520919

Khorramdel, S., & Vali Elahi Bisheh, A. (2023). The Circle of Salvation: Empowering Rural Women - Protection and Restoration of Natural Areas - Sustainable Development. In *International Congress of Sustainable Natural Resources, Medicinal Plants and Knowledge-Based Production*. 36-46. [In Persian] https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1093721.html

Kishor, S., & Subaiya, L. (2005). Household decision making as empowerment: A methodological view. In *presentation at the 2005 Meeting of the International Union for the Scientific Study of Population (IUSSP), Tours, France*, 152-188. https://www.demoscope.ru/weekly/knigi/tours_2005/papers/iussp2005s51452.pdf

Lahijanian, A. A. M., & Vaskoui, N. (2016). Investigating the empowerment of rural women in environmental protection. *Environmental Science and Technology*, *18*(4), 163-175. [In Persian]

Lalianpour, N., Dosti, N., & Mohammadzadeh, A. (2011). The concept of empowerment and organizational commitment of employees, case study: an insurance company. *Insurance World News*, *14*(163), 24-39. [In Persian]

Manda, J., & Mvumi, B. M. (2010). Gender relations in household grain storage management and marketing: The case of Binga District, Zimbabwe. *Agriculture and Human Values*, *27*(1), 85-103. https://doi.org/10.1007/s10460-008-9171-8

Md, A., Gomes, C., Dias, J. M., & Cerdà, A. (2022). Exploring Gender and Climate Change Nexus, and Empowering Women in the South Western Coastal Region of Bangladesh for Adaptation and Mitigation. *Climate*, *10*(11), 172. https://doi.org/10.3390/cli10110172

Merchant, C. (1981). Earthcare: Women and the environment. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, *23*(5), 6-40. https://doi.org/10.1080/00139157.2020.1750918

Miller, J. T. (2008). *Living in the Environment*. In M. Makhdoom (Eds.), Tehran: University of Tehran Printing and Publishing Institute. [In Persian]

Mobashari Shiri, A., & Asghari Lafamjani, S. (2021). Analysis of the effects of handmade carpet production on the livelihood of rural households in Fasa County. *Spatial Planning. 11*(3), 25-43. [In Persian] https://doi.org/10.22108/sppl.2020.118794.1416

Mosedale, S. (2005). Assessing women's empowerment: towards a conceptual framework. *Journal of International Development*, *17*(2), 243-257. https://doi.org/10.1002/jid.1212

Mukamwezi, A., Ocan, J., & Akena Adyanga, F. (2024). The Role of Savings and Lending Groups in the Financial Inclusion of Rural Women Entrepreneurs: A Case Study of IMPABARUTA Cooperative in Kamonyi District, Rwanda. *East African Journal of Business and Economics*, *7*(2), 416–430. https://doi.org/10.37284/eajbe.7.2.2560

Mutimukuru-Maravanyika, T., Mills, D. J., Asare, C., & Asiedu, G. A. (2017). Enhancing women's participation in decision-making in artisanal fisheries in the Anlo Beach fishing community, Ghana. *Water Resources and Rural Development*, *10*, 58-75. https://doi.org/10.1016/j.wrr.2016.04.001

Ndiritu, S. W., Kassie, M., & Shiferaw, B. (2014). Are there systematic gender differences in the adoption of sustainable agricultural intensification practices? Evidence from Kenya. *Food Policy*, *49*, 117-127. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.06.010

O'Brien, C., Gunaratna, N. S., Gebreselassie, K., Gitonga, Z. M., Tsegaye, M., & De Groote, H. (2016). Gender as a cross-cutting issue in food security: the NuME Project and quality protein maize in Ethiopia. *World Medical & Health Policy*, *8*(3), 263-286. http://dx.doi.org/10.1002/wmh3.198

Page, T. E. (2008). *"The problem of the land is the problem of the woman": A genealogy of ecofeminism at Grailville*. Harvard University. http://www.jstor.org/stable/40211980

Parpart, J. L. (2008). Masculinity/ies, gender and violence in the struggle for Zimbabwe. In J. L. Parpart & M. Zalewski (Ed.). *Rethinking the Man Question: Sex, Gender and Violence in International Relations*. Zed Books.

Quisumbing, A. R., & Pandolfelli, L. (2010). Promising approaches to address the needs of poor female farmers: Resources, constraints, and interventions. *World Development*, *38*(4), 581-592. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2009.10.006

Raman, P. (2025). Economic Empowerment of Rural Women in Developing Countries: Hands on Training on Horticultural Produce. *Social Science Research Network*. 76-80. https://doi.org/10.2139/ssrn.5074501

Ramezani Ghavamabadi, M. H. (2009). Participation and role of women in international environmental law. *Social-Psychological Studies of Women (Women's Studies)*, *7*(3), 53-70. [In Persian] https://sid.ir/paper/66023/fa

Riahi, V., Javan, F., & Dehghani, N. (2016). Analysis of villagers' views on environmental protection training in rural areas (case study: Rezvanshahr County). *Human and Environment*, *14*(4), 67-78. [In Persian] https://sanad.iau.ir/Journal/he/Article/848425

Richardson, R. A. (2018). Measuring women's empowerment: A critical review of current practices and recommendations for researchers. *Social Indicators Research*, *137*(2), 539-557. https://doi.org/10.1007/s11205-017-1622-4

Samadi Kouchaksaraei, B., Rezaei Toabeh, K., Gholamzadeh, P., Zohrabi, H., & Moradi, N. (2013). Evaluation of Suitable Decision-making Methods to Select the Best Method for Parishan. *Environmental Education and Sustainable Development*, *12*(1), 1-17. [In Persian] https://doi.org/10.30473/ee.2023.63378.2500

Seifi, A. (2019). The role of united nation development in women empowering. *Social Work Research*, *6*(20), 193-233. [In Persian] https://doi.org/10.22054/rjsw.2021.49197.370

Tanellari, E., Kostandini, G., Bonabana-Wabbi, J., & Murray, A. (2014). Gender impacts on adoption of new technologies: the case of improved groundnut varieties in Uganda. *African Journal of Agricultural and Resource Economics*, *9*(311-2016-5619), 300-308. 10.22004/ag.econ.197017

Tarasi, Z., Karimzadeh, H., & Aghayari-Heer, M. (2019). Capacity Building in Rural Areas to Empower Women Case Study: Zanjan County. *Geography and Development*, 18(58), 203-224. [In Persian] https://sid.ir/paper/358463/fa

Zafari-Nasab, M., Golzari, Z., Noorian, M,. & Razavi, H. (2022). Meta-Synthesis Factors Affecting the Empowerment of Rural Women. *Village and Development*, *24*(4), 47-70. [In Persian] 10.30490/rvt.2021.351827.1274

Zain-al-Abedin Amoghin, Y., & Ghorbaninezhad, R. (2022). Explaining the geopolitical developments in the relationship between humans and the environment (perspective-providing solutions). *Humans and Environment*, *20*(3), 1-16. [In Persian] https://he.srbiau.ac.ir/article_16550.html

Vol.14, No.2, Summer 2025, p.223-244 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

Research Article DOI: 10.22067/geoeh.2025.91165.1535 Open Access

Investigating the Role of Landforms in Soil Erosion Rates Using the RUSLE Model and GEE System (Case Study: Basins of the Southern Slope of the Sahand Mountain Massif)

Mousa Abedini [1]*, Aboozar Sadeghi [2], Aghil Madadi [3]

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

[2] PhD Student in Geomorphology, Department of Physical Geography, Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

[3]Professor in Geomorphology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Article Info

Article History

Received: 23 December 2024

Revised: 27 January 2025

Accepted: 06 February 2025

Available Online: 07 February 2025

Keywords:

Landform Classification

Soil Erosion

Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

Google Earth Engine (GEE)

Watershed Management

Abstract

This study aimed to investigate the role of landforms in soil erosion across the southern slope basins of the Sahand mountain range. Using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model and the Google Earth Engine (GEE) platform, key factors affecting erosion including rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), slope length and steepness (LS), vegetation cover management (C), and soil conservation practices (P) were analyzed, and landforms were classified within this system. The results indicated that areas with very high and high erosion levels, covering approximately 0.45% of the total area, were predominantly located on steep slopes and at higher elevations, where increased rainfall and reduced vegetation cover led to severe erosion. Conversely, areas with low and very low erosion characterized by dense vegetation and gentle slopes accounted for more than 95% of the study area. Furthermore, the analysis revealed that landforms such as water channels, cliffs, and narrow valleys exhibited the highest erosion rates, whereas flatter features like plains and alluvial terraces experienced the least erosion. This study highlights the strong potential of GEE for large-scale geospatial analysis and presents an effective approach to sustainable land management and erosion mitigation. These findings can support policymakers and researchers in planning targeted protective measures for similar watersheds.

*Corresponding author: Dr. Mousa Abedini E-mail address: Abedini@uma.ac.ir

How to cite this article: Abedini, M., Sadeghi, A., & Madadi, A. (2025). Investigating the Role of Landforms in Soil Erosion Rates Using the RUSLE Model and GEE System, Case Study: Basins of the Southern Slope of the Sahand Mountain Massif. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(2), 223-244. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.91165.1535

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Soil erosion represents one of the most pressing environmental challenges, significantly impacting natural resources and hindering sustainable development. It depletes soil fertility, jeopardizes food security, threatens biodiversity, and disrupts the global carbon cycle. Several factors contribute to erosion, including climatic conditions such as intense rainfall, topographical elements like slope gradient, soil characteristics, and human activities such as land-use change, deforestation, and overgrazing.

Landforms play a critical role in determining the severity and spatial distribution of soil erosion. Geomorphological analysis offers valuable insights into the interaction between natural processes and anthropogenic activities, thereby supporting sustainable land management. This study aims to assess the influence of landforms on soil erosion by applying the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model in conjunction with the spatial data processing capabilities of Google Earth Engine (GEE).

Study Area

This research was conducted in the southern slope basins of the Sahand Mountain Range, located in East Azerbaijan Province, Iran. The study area includes the Qaleh Chay, Sufi Chay, Mardagh Chay, Lilan Chay, and parts of the Qaranqu basins. Elevation in the region ranges from 3964 meters in mountainous areas to 1236 meters in the plains, covering a total area of 3821.41 km². The region's diverse topography, variable precipitation, and heterogeneous vegetation make it an ideal case for examining the effects of landforms on soil erosion.

Material and Methods

The RUSLE model was used to estimate soil erosion. This model calculates average annual soil loss based on five factors:

- Rainfall erosivity (R): Represents the intensity and kinetic energy of rainfall.
- Soil erodibility (K): Indicates the vulnerability of soil to erosion.
- Slope length and steepness (LS): Reflects the topographic impact on erosion potential.
- Vegetation cover management (C): Accounts for the protective effects of land cover.
- Conservation practices (P): Evaluates the effectiveness of soil conservation methods.

These factors were derived using long-term rainfall data, satellite imagery, digital elevation models (DEMs), and land-use maps, all processed through the Google Earth Engine (GEE) platform. Landform classification was performed using the Multi-Scale Topographic Position Index (MTPI) within GEE to identify and categorize distinct geomorphic units.

Results and Discussion

Erosion mapping revealed that soil loss in the study area ranged from 0 to 40 tons per hectare per year. Areas with very high and high erosion, making up only 0.45% of the total area, were mostly located on steep slopes at higher elevations, where rainfall intensity was greater and vegetation cover was sparse. In contrast, more than 95% of the area experienced low to very low erosion, typically found in flat plains and densely vegetated regions.

Landform classification further showed that features such as water channels, cliffs, and narrow valleys exhibited the highest erosion rates, whereas flatter landforms like alluvial terraces and plains were associated with the lowest erosion levels.

Conclusion

This study demonstrates that the RUSLE model combined with GEE is a powerful tool for conducting large-scale soil erosion assessments. The integration of GEE enabled high-resolution spatial analysis, efficient data processing, and improved model accuracy. The findings indicate that very high and high erosion zones, covering approximately 17.33 km², are concentrated in upper watershed areas characterized by higher altitudes, greater rainfall, and limited vegetation cover. Conversely, low and very low erosion zones, accounting for about 3623.11 km², are located in flatter areas with dense vegetation. This research underscores the importance of incorporating landform analysis into natural resource management and soil conservation strategies. The outcomes provide essential insights for policymakers to prioritize vulnerable areas for conservation initiatives and promote sustainable land-use planning.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۲۴۴-۲۲۳

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2025.91165.1535 دسترسی آزاد

بررسی نقش لندفرم‌ها در میزان فرسایش خاک با مدل RUSLE و سامانه GEE، مطالعه موردی: حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

موسی عابدینی [۱]، ابوذر صادقی [۲*]، عقیل مددی [۳]

[۱،۳] استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

[۲] دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸

کلمات کلیدی:

طبقه‌بندی اشکال زمین

فرسایش خاک

معادله بازنگری‌شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE)

موتور گوگل ارث انجین (GEE)

مدیریت حوضه آبخیز

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی نقش لندفرم‌ها در میزان فرسایش خاک در حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند انجام شد. با استفاده از مدل اصلاح‌شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) و سامانه گوگل ارث انجین (Google Earth Engine)، عوامل مؤثر بر فرسایش شامل فرسایندگی بارش (R)، فرسایش‌پذیری خاک(K) ، طول و شدت شیب (LS)، مدیریت پوشش گیاهی (C) و عملیات حفاظتی خاک (P) مورد ارزیابی قرار گرفت و طبقه‌بندی لندفرم‌ها نیز در این سامانه انجام گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که مناطق با فرسایش خیلی زیاد و زیاد با مساحتی حدود ۰/۴۵ درصد معادل ۱۷/۳۳ کیلومترمربع را شامل می‌شود. این مناطق در بالادست حوضه که دارای ارتفاع بالا، میانگین بارندگی بیشتر و دارای پوشش گیاهی کمتری بوده رخ داده است. مناطق با فرسایش خیلی کم و کم مساحتی حدود ۹۵/۵۴ درصد معادل ۳۶۲۳/۱۱ کیلومترمربع بوده است که در مناطق دارای پوشش گیاهی پر تراکم، بارندگی کم‌تر و در مناطق دشت‌ها و مسطح بوده است. علاوه بر این، تحلیل لندفرم‌های منطقه نشان داد که بیش‌ترین میزان فرسایش در لندفرم‌های آبراهه‌ها، پرتگاه‌ها و دره‌های باریک مشاهده می‌شود. در حالی‌که لندفرم‌های مسطح‌تر نظیر دشت‌ها و تراس‌های آبرفتی از فرسایش کمتری برخوردارند. استفاده از سامانه GEE در این پژوهش قابلیت بالای آن را در ترکیب و تحلیل داده‌های جغرافیایی مقیاس‌پذیر نشان داد و روشی مؤثر برای مدیریت پایدار اراضی و کاهش فرسایش خاک فراهم آورده شد. این یافته‌ها می‌توانند در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و اجرای عملیات حفاظتی در حوضه‌های آبخیز مشابه، توسط مسئولین و محققین مورد استفاده قرار گیرند.

*نویسنده مسئول: دکتر موسی عابدینی E-mail: Abedini@uma.ac.ir

مقدمه

فرسایش خاک و تخریب زمین ناشی از آن، به عنوان یکی از جدی‌ترین مشکلات محیط زیست جهانی موثر بر توسعه پایدار بشر، توجه گسترده سیاستگذاران و محققان را به خود جلب کرده است (Wang & Su, 2020). فرسایش خاک توانایی تغییر ساختار خاک را دارد و بر حاصلخیزی خاک، بهره‌وری زمین، امنیت غذایی، تنوع بیولوژیکی و چرخه جهانی کربن تأثیر منفی می‌گذارد (Hua, Zhao, Liu & Liu, 2019). علت فرسایش خاک به شرایط اقلیمی بویژه بارش‌های رگباری، توپوگرافی و شیب زیاد زمین، لیتولوژی و فعالیت‌های انسانی مانند تغییر کاربری زمین، از بین بردن پوشش گیاهی، افزایش تولیدات کشاورزی، چرای بی رویه دام و غیره مربوط می‌شود (Karami & Bayati Khatibi, 2019).

مطالعه درباره ارتباط بین پوشش گیاهی و طبقه‌بندی لندفرم اهمیت دارد زیرا توزیع پوشش گیاهی، برپایه تجزیه وتحلیل ویژگی های لندفرم، از جنبه‌های مهم فرایند درک اکولوژی است (Hoersch, Braun & Schmidt 2002; Pfeffer, Pebesma & Burroug, 2003; Zawawi, Shiba, Janatun & Jemali, 2014). تجزیه و تحلیل زمین و لندفرم‌ها به همراه اطلاعات داده‌های خاک و زمین‌شناسی سطحی، به درک توپوگرافی منطقه کمک می‌کند و مناسب‌ترین مکان‌ها را برای استفاده‌های گوناگون زمین، تعیین می‌کند. فرم زمین (Landform) اصطلاح کلی برای اشکال مختلف سطح زمین است (Mokarram & Sathyamoorty, 2018). اشکال زمین، به عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای محیط جغرافیای فیزیکی (Summerfield, 2014) هسته اصلی پژوهش‌های جغرافیایی را تشکیل می‌دهد (Xiong, Tang, Yang & Li, 2021). هر شکل زمین حاوی اطلاعات جغرافیایی زیادی در مورد محیط طبیعی، منابع اکولوژیکی و فعالیت‌های انسانی است (Du et al., 2019). انواع مختلف اشکال زمین تحت تأثیر نیروهای درونی مانند هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی و اکولوژیکی شکل گرفته‌اند (Evans, 2012). در علوم زمین بسیار مورد توجه قرار گرفته است زیرا دامنهٔ کاربرد گسترده‌ای دارد؛ از جملهٔ این کاربردها می‌توان به تهیهٔ نقشهٔ سنگ‌شناسی، پیش‌بینی ویژگی‌های خاک و تهیهٔ نقشهٔ پوشش گیاهی و کشاورزی دقیق اشاره کرد (Pififfner & Kuhni, 2003; Florinsky, Eilers, Manning & Fuller, 2002).

اصل طبقه‌بندی زمین‌ریخت‌ها باید به گونه‌ای باشد که نه تنها انواع مختلف این شکل‌های زمین را شناسایی و دسته‌بندی کند و تنوع ساختار فضایی آن‌ها را نمایش دهد، بلکه بتواند دلایل شکل‌گیری آن‌ها را هم توضیح دهد. به این معنا که باید مشخص کند این زمین‌ریخت‌ها چگونه و تحت تأثیر چه عواملی، مانند نیروهای خارجی مثل فرسایش، باد، آب یا فعالیت‌های انسانی، در طی زمان و در مکان‌های مختلف به وجود آمده‌اند و تغییر کرده‌اند. این رویکرد به درک عمیق‌تر ما از فرآیندهای زمین‌شناسی کمک می‌کند (Zhang et al., 2020). ساختار اشکال زمین در مقیاس‌های مختلف به راحتی قابل فهم نیست و از نظر مقیاس، عمومیت ندارد و بین مناطق مختلف مطالعه تفاوت دارد. بافت زمین، که یکی از اجزای سطح اشکال زمین است، ویژگی‌های خاص و منحصر به فردی را برای اشکال زمین ایجاد کرده است (Shang et al., 2020; Trevisani & Rocca, 2015). طبقه‌بندی اشکال زمین که شامل شناسایی و تقسیم سطح زمین به انواع مختلف اشکال زمین می‌شود، اساس و اولین گام در نقشه‌برداری ژئومورفولوژی است (Mokarram & Sathyamoorthy, 2018).

در سال‌های اخیر، با بهره‌گیری از منابع داده‌های مختلف مانند مدل رقومی ارتفاع (DEM)، روش‌های سنتی به تدریج با روش‌های خودکار مختلف، به ویژه تکنیک‌های طبقه‌بندی رقومی عوارض زمین، جایگزین شده‌اند (Draguţ & Eisank, 2011). با توسعه‌ی روش‌های کسب داده‌های DEM، طبقه‌بندی عوارض زمین با استفاده از DEM به دلیل دقت بالا و طرح طبقه‌بندی منطقی‌اش، به یک تکنیک اصلی و نقطه داغ در طبقه‌بندی عوارض زمین تبدیل شده است (Xiong, Zhu, Zhang & Tang, 2018). تاکنون، دو تکنیک اصلی برای تشخیص فرم زمین را می‌توان به عنوان روش‌های مبتنی بر پیکسل و مبتنی بر شیء نتیجه گیری کرد (Li, Xioung, Tang & Strobl, 2020). در رویکرد مبتنی بر پیکسل، فرم زمین به عنوان یک واحد مقیاس منطقه‌ای، از نظر

روابط توپولوژیکی، اطلاعات مورفولوژیکی و ساختار فضایی آن در نظر گرفته نمی‌شود (Cao, Fang, Yao & Xiong, 2020). روش مبتنی بر شیء که نسبت به انواع مختلف فرم‌های زمین حساس است، بر اساس ناپیوستگی‌های مورفولوژیکی، رویکرد محبوب دیگری است و به‌طور گسترده در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Verhagen & Dragu, 2012).

تشخیص شکل زمین مبتنی بر آبخیز به تدریج به نقطه جدیدی در زمینه تشخیص شکل زمین تبدیل شده است و پتانسیل کافی و عملکرد خوبی را در مطالعات مرتبط نشان داده است. شناسایی لندفرم‌های مختلف در یک منطقه یا حوضه آبریز و تهیه نقشه در بازه زمانی مختلف و تحلیل روند تغییرات آنها ازجمله کاربردهای اختصاصی تصاویر ماهواره‌ای است. در امر مدیریت محیط، معمولاً ارزیابی ماهیت بلایای طبیعی، منابع طبیعی و به ویژه نحوه توزیع و تغییرات آن‌ها برحسب زمان، کاربرد نقشه لندفرم و مطالعات ژئومورفولوژیکی را ضروری می‌سازد. مطالعاتی در این رابطه انجام شده ولی اینکه دقیقا بحث لندفرم بر فرسایش در سامانه GEE اندک بود؛ که می‌توان به این موارد داخلی و خارجی اشاره کرد: کرمی و همکاران (Karami, Mokhtari & Ahmadi, 2023) به بررسی نقش لندفرم‌ها در میزان فرسایش خاک حوضه آبریز زنوزچای پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیش‌ترین فرسایش در مجموع دره‌ها و بریدگی‌های واقع بر ارتفاعات و دامنه‌ها با مساحت ۹۴/۲۷ کیلومترمربع و سپس ستیغ‌های مرتفع و قله کوه‌ها با ۸۹/۲۱ کیلومتر مربع اختصاص دارد. عابدینی و صادقی (Abedini & Sadeghi, 2024) به بررسی فرسایش در حوضه مردق چای با استفاده از مدل RUSLE در سامانه GEE پرداختند. به این نتیجه رسیدند که میزان فرسایش در مناطق بالادست حوضه که میزان بارش بالا و پوشش گیاهی کم‌تر بوده فرسایش بیش‌تر بوده است. مطالعه‌ای توسط سنتانی و همکاران (Sentani, Niam & Boogaard, 2024) در مورد بررسی احتمال فرسایش با استفاده از روشRUSLE و پلتفرم (GEE) در حوضه آبخیز تونتانگ اندونزی انجام شد. این پژوهش از داده‌های متنوعی شامل داده‌های بارش (CHIRPS)، نقشه‌های خاک (Open Land Map)، تصاویر ماهواره‌ای (Sentinel-2) و مدل‌های توپوگرافی (SRTM) برای برآورد پارامترهای مدل RUSLE بهره برد. نتایج نشان داد که فرسایش خاک در حوضه تونتانگ طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱ عمدتاً در سطح متوسط بوده و مناطق با فرسایش شدیدتر در بخش‌های زیرحوضه‌های سنجویو[1]، روپنینگ[2] و توتانگ هیلیر[3] مشاهده شده‌اند. به‌ویژه، زیرحوضه روپنینگ بیش‌ترین نرخ فرسایش (تا حدود ۴۰ تن در هکتار در سال) را به دلیل عوامل انسانی و تغییرات کاربری زمین تجربه کرده است. استفاده از پلتفرم GEE در این مطالعه، امکان تحلیل و تجسم دقیق داده‌های جغرافیایی و فضایی را فراهم آورده است. یکی دیگر از مطالعات برجسته در زمینه ارزیابی فرسایش خاک، تحقیق انجام‌شده توسط سود و همکاران (Sud et al., 2024) است که به بررسی فرسایش خاک در حوضه آبخیز ستلج با استفاده از مدل RUSLE و پلتفرمGoogle Earth Engine پرداخته است. این مطالعه از روش‌های نوین سنجش از دور و تحلیل جغرافیایی برای برآورد عوامل اصلی RUSLE استفاده کرده است. نتایج نشان دادند که ۹۲ درصد از منطقه مطالعه با فرسایش شدید مواجه است و میانگین فرسایش سالانه برابر با ۱۰۷۴۰ تن در هکتار در سال بوده است. این تحقیق روش‌شناسی جامعی برای تحلیل‌های بزرگ‌مقیاس ارائه داده و بر اهمیت استفاده از داده‌های ابری برای مدیریت منابع طبیعی و کاهش اثرات فرسایش تأکید کرده است.

در منطقه خاک سیاه (یان‌شو، چین) به دلیل فعالیت‌های طبیعی و انسانی شدید، دچار فرسایش پیچیده‌ای شده که منجر به تخریب خاک و تأثیرات منفی زیست‌محیطی و کشاورزی شده است. گائو و همکاران (Gao et al., 2024) به مطالعه ارزیابی دقیق فرسایش خاک، با استفاده از فناوری رادار تداخل‌سنجی (InSAR) و الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پلتفرم Google Earth Engine در این منطقه پیشنهاد دادند. این روش امکان پایش در مقیاس منطقه‌ای با دقت میلی‌متری را فراهم می‌آورد. همچنین، آسیب‌پذیری منطقه‌ی مطالعه (شهرستان یان‌شو، چین) با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی ارزیابی شده است.

1- Senjoyo
2-Rowopening
3-Tuntang Hilir

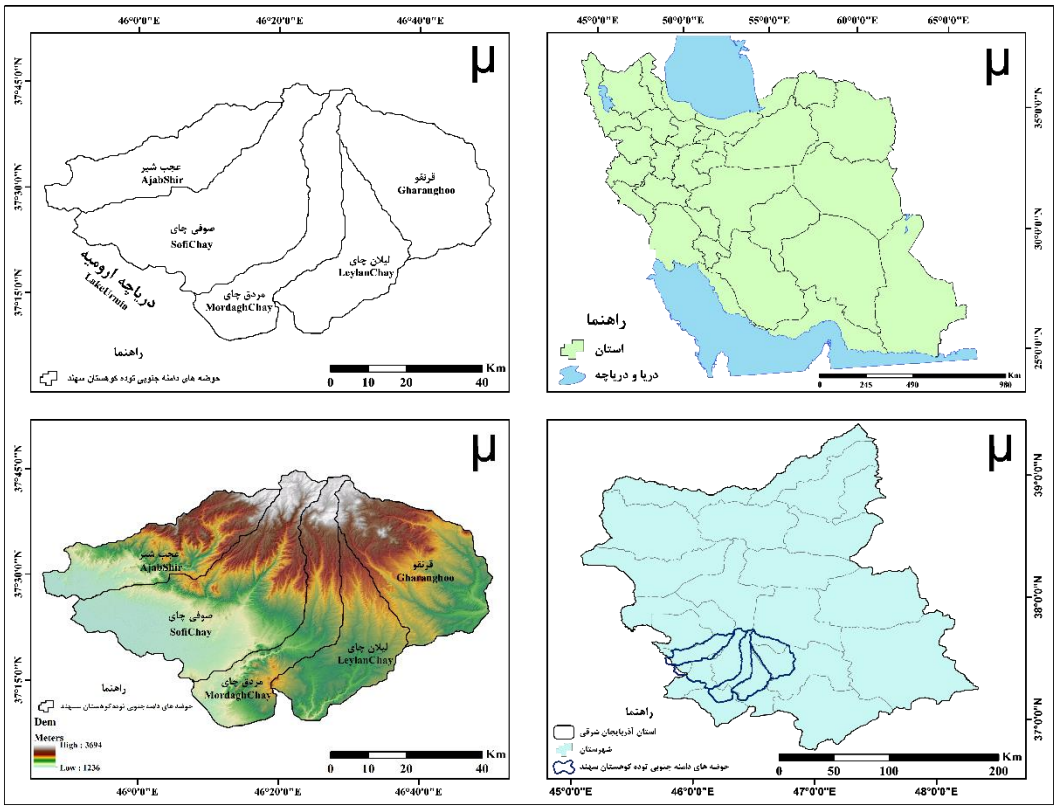
نتایج نشـان می‌دهند که در پنج‌سـال گذشـته، تغییرشـکل خاک منفی بوده و عوامل مؤثر شـامل فرسـایش آب و یخ‌زدگی–ذوب‌شدن است. ۷۳/۳٪ از منطقه مستعد فرسایش است، به‌ویژه در مناطق رودخانه‌ای، ارتفاعات بالا و شیب‌های تند. پوشش گیاهی مناسـب می‌تواند خطر فرسـایش را کاهش دهد. این روش قابلیت گسـترش برای پایش فرسـایش خاک در مناطق وسـیع‌تر را دارد و می‌تواند به استراتژی‌های حفاظت از خاک‌های کشاورزی کمک کند.

در این پژوهش از سامانه GEE برای استخراج لندفرم‌ها و همچنین محاسبه فرسایش با استفاده از مدل RUSLE استفاده شد. که می‌توان گفت جزء اولین کارهایی است که در داخل ایران با استفاده از این سامانه متن باز قدرتمند انجام شده است. به همین دلیل شاید امکان خطا در بعضی از نقشه‌ها باشد. سامانه GEE که یک سامانه آنلاین و دارای داده‌های زیادی بوده برای انجام کار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های موجود یکی از بهترین سامانه‌های متن باز و کدنویسی در زمینه علوم مکانی است.

این تحقیق با معرفی استفاده از پلتفرم Google Earth Engine (GEE) در تحلیل تأثیر لندفرم‌ها بر فرسایش خاک، گامی مهم در ارتقا دقت و کارایی مدل‌سـازی فرسـایش در مقیاس‌های وسـیع برداشـته اسـت. با اسـتفاده از این سـامانه، که دسـترسـی به مجموعه‌های عظیم داده‌های ماهواره‌ای و منابع اطلاعاتی متنوع را فراهم می‌آورد، برای اولین‌بار این توانمندی به‌کار گرفته شـده تا فرسـایش خاک در ارتباط با ویژگی‌های لندفرم‌های مختلف در مناطق گسـترده ارزیابی شـود. این مطالعه نه‌تنها در انتخاب روش جدید تحلیل، بلکه در کاربرد عملی GEE برای مدل‌سـازی فرسـایش خاک با اسـتفاده از داده‌های فضـایی دقیق و به‌روز اسـت، که امکان انجام تحلیل‌های مکانی–زمانی پیشرفته را به‌طور چشمگیری تسهیل کرده است.

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش حوضـه‌های دامنه جنوبی توده کوهسـتان سـهند اسـت. حوضـه قلعه چای که از سـهند سـرچشـمه گرفته و در نهایت وارد حوضه دریاچه ارومیه می‌شود. حوضه صوفی چای که سد علویان نیز بر روی این حوضه احداث شده است از شهرستان‌های مراغه و بناب عبور کرده تا در نهایت وارد حوضه دریاچه ارومیه می‌شود. حوضه آبخیز مردق‌چای پس از سرچشمه گرفتن از کوهستان سهند، از شرق شهرستان مراغه عبور می‌کند، سپس وارد شهرستان ملکان شده و در نهایت به حوضه دریاچه ارومیه می‌ریزد. حوضـه لیلان چای نیز وارد وارد رودخانه زرینه رود می‌شـود و بخشـی از حوضـه قرنقو که در قسـمت جنوبی کوهسـتان سـهند قرار گرفته اسـت محدوده مورد مطالعه در این پژوهش هسـتند. میانگین ارتفاعی این حوضـه‌ها برابر با ۱۸۷۵ متر، بالاترین نقطه ارتفاعی ۳۹۶۴ و کم‌ترین نقطه ارتفاعی ۱۲۳۶ متر است (DEM SRTM 30m). مساحت کل حوضه‌های مورد مطالعه برابر با ۳۸۲۱/۴۱ کیلومتر مربع بوده است (شکل۱).



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

Fig.1. Study area, in the south slopes of Sahand mountain range

روش تحقیق

برای طبقه‌بندی لندفرم‌های حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهنداز یک مدل چند مقیاسه (MTPI) استفاده شد. این مدل توسط تئوبالد و همکاران (۲۰۱۵) به کار گرفته شد؛ با استفاده از نقشه های حاصل از مدل TPI و نقشه‌های ترکیب شده TPI با سنگ‌شناسی و نقشه‌های تنوع فیزیوگرافی برای تولید نقشه‌های مرتبط با محیط زیست و سازگاری موجودات زنده با آب و هوا را تولید کردند. شالوده این مدل بر پایه مدل TPI و نقشه سایه و روشن متاثر از زاویه تابش خورشید، که شکل و فرم پدیده های ژئومورفولوژی را در یک منطقه نشان می‌دهند، پایه گزاری شده است. شاخص موقعیت توپوگرافی TPI نشان دهنده ارتفاع هر سلول در یک مدل رقومی ارتفاعی DEM که نسبت به میانگین ارتفاع سلول‌های اطراف آن سلول در یک شعاع مشخص، مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ یا به عبارتی اختلاف بین ارتفاع هر سلول نسبت به میانگین ارتفاع سلول‌های اطراف آن می‌باشد برای محاسبه شاخص موقعیت توپوگرافی TPI از رابطه‌های (۱ و ۲) استفاده می‌شود (Sepahvand, Ahmadi, Nazari Samani & FeyzNiya, 2017).

$$TPI = Z_0 - \bar{Z} \quad (۱)$$

$$Z = \frac{1}{n_R}\sum i \in R^{Zi} \quad (۲)$$

که در آن $\bar{Z}$ ارتفاع نقطه مورد بررسی، Z ارتفاع میانگین نقاط حاشیه، n تعداد نقاط اطراف R شعاع تعیین شده برای بررسی نقاط همسایه است مطابق (رابطه ۱ و رابطه۲) مقادیر TPI می‌تواند دارای سه حالت منفی، مثبت و صفر با شد مقادیر مثبت نشان می‌دهند که ارتفاع نقطه مرکزی بیشتر از میانگین ارتفاع نقاط اطرافش است (تپه‌ها و کوه‌ها)، مقادیر منفی نشان می‌دهند که ارتفاع نقطه

مرکزی کمتر از میانگین ارتفاع نقاط اطرافش است (دره‌ها) و مقادیر صفر یا نزدیک به صفر و شیب کمتر از ۵ درجه باشد، نشان دهنده مناطق هموار (دشت‌ها) است.

در این پژوهش از سامانه (GEE) برای برآورد فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE استفاده شده است. عوامل مختلفی از جمله فرسایندگی بارش-رواناب (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، طول شیب (L)، شیب زمین (S)، مدیریت کشت (C) و روش‌های حمایتی حفاظت از خاک (P) با استفاده از لایه‌های استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای و مجموعه داده‌های محیطی ترکیب شدند. فرسایندگی بارش (R) بر اساس داده‌های بارش بلندمدت تعیین شد. فرسایش‌پذیری خاک (K) از طریق GEE و با در نظر گرفتن انواع خاص خاک برای حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند برآورد شد. عامل LS، مدیریت کشت (C) و روش‌های حمایتی حفاظت از خاک (P)با استفاده از GEE و داده‌های ماهواره‌ای محاسبه شدند. در این پژوهش همچنین شاخص تفاوت نرمال‌شده پوشش گیاهی(NDVI) را در محاسبه عامل پوشش و مدیریت (C) استفاده شد، تا تغییرات فصلی در پوشش گیاهی را در نظر گرفته باشد. شیب زمین به‌عنوان یک عامل کلیدی در نظر گرفته شد. روش‌شناسی مبتنی بر GEE درک فضایی و دقیقی از پتانسیل فرسایش خاک در سراسر حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند فراهم کرد و بر قابلیت گسترش، کارایی و دقت در مدیریت داده‌های جغرافیایی مقیاس بزرگ برای مدل‌سازی فرسایش خاک تأکید داشت. نتایج این تحقیق بینش‌هایی برای اجرای شیوه‌های مدیریت پایدار اراضی در منطقه فراهم می‌آورد.

مدل RUSLE

برای حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند ، فرسایش خاک با استفاده از تکنیک‌های مدل RUSLE محاسبه شد. مدل فرسایش RUSLE میانگین سالانه از دست دادن خاک در طول زمان را پیش‌بینی می‌کند که ناشی از جریان سطحی از شیب‌های میدانی در شرایط زراعی خاص و رژیم‌های کنترلی، همچنین در مراتع است. رابطه (۳)، روش RUSLE را به صورت فنی نشان می‌دهند.

$$A= R*K*LS*C*P \quad (۳)$$

A میزان خاک فرسایش یافته (تن در هکتار در سال) ، R عامل فرسایندگی بارش-رواناب، K عامل فرسایش‌پذیری خاک، LS طول شیب همراه با درجه شیب، C عامل مدیریت پوشش گیاهی، P عامل حفاظت خاک (Petito et al., 2022).

عامل فرسایندگی باران (R)

عامل فرسایندگی بارش (R) نقش کلیدی در تأثیرگذاری بر پتانسیل فرسایش خاک ایفا می‌کند. شدت بارندگی یکی از عوامل تعیین‌کننده اصلی فرسایش خاک است (Nam, Lee, Chung & Jeong, 2014). فرسایش سطحی و شیاری که اغلب به‌واسطه جریان رواناب شدید ایجاد می‌شود، با افزایش نرخ بارندگی و اندازه بزرگ‌تر قطرات باران تشدید شده و باعث تسریع در جدایش ذرات خاک می‌گردد (Shen, Zheng, Wen, Han & Hu, 2016). برای محاسبه R، از داده‌های بارندگی ماهانه در بازه‌ای ۲۰ ساله (۲۰۲۱–۲۰۰۱) استفاده شده است. رابطه (۴) به‌طور گسترده‌ای توسط پژوهشگران در سطح جهانی مورد استفاده قرار گرفته است (Parveen & Kumar, 2012).

$$R = 79 + 0.363 \times P \quad (۴)$$

در این معادله، R نمایانگر عامل فرسایندگی بارش (MJ mm ha^{-1} h^{-1}/yr) و P نشان‌دهنده بارش سالانه (میلی‌متر) است (Diodato, 2004).

عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)

عامل فرسایش خاک (K) نقش حیاتی در ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی خاک نسبت به فرسایش ناشی از بارش و رواناب ایفا می‌کند (Musa, Anijofor, Obasa & Avwevuruvwe, 2017). این عامل به ویژگی‌های مختلف خاک از جمله خصوصیات کانی‌شناسی، فیزیکی، شیمیایی و مورفولوژیکی وابسته است. میزان از دست دادن خاک را به ازای هر واحد انرژی فرسایشی ناشی از بارندگی، در شرایط مرجع یک قطعه زمین استاندارد با خاک برهنه و تمیز، شیب ۹٪ و طول ۲۲ متر محاسبه می‌کند. در این مطالعه که در حوزه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند انجام شده است، از تحلیل‌های جغرافیایی مبتنی بر ابر با استفاده از پلتفرم GEE برای تخمین عامل K بهره گرفته شد. نقشه‌های انواع خاک و بافت خاک حوزه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند استفاده شد (Panagos, Meusburger, Ballabio, Borrelli & Alewell, 2014).

عامل توپوگرافی (LS)

عامل LS، که یکی از اجزای کلیدی در ارزیابی نرخ فرسایش خاک است، طول شیب (L) و شدت شیب (S) را در یک شاخص واحد ادغام می‌کند (Das, Bora & Das, 2022). در حالی که عامل L تأثیر طول شیب بر فرسایش را با در نظر گرفتن فاصله از نقطه آغاز رواناب تا ناحیه رسوب‌گذاری محاسبه می‌کند، عامل S بازتابی از تأثیر شدت شیب بر فرسایش خاک است.

$$LS = (\text{Flow Accumulation} \times \text{Cell Size}/0.0896)\ 0.4 \times (\text{sinSlope}/0.0896)1.3 \quad (۵)$$

در رابطه (۵) LS، نمایانگر ترکیب عامل شدت شیب و طول شیب است، اندازه سلول یا وضوح مدل ارتفاعی دیجیتال (DEM) به‌عنوان Cell Size مشخص می‌شود، و زاویه شیب به‌صورت sinSlope تعریف می‌گردد (Zhang et al., 2017).

تجمع جریان(Flow Accumulation) ، که جزء اساسی در محاسبه عامل LS است، مساحت کل منطقه بالادستی که به هر سلول مدل ارتفاعی جریان می‌یابد را کمی‌سازی می‌کند. این پارامتر پتانسیل جریان آب و فرسایش را در نواحی خاص نشان می‌دهد. مقادیر بالاتر تجمع جریان با افزایش پتانسیل رواناب و حساسیت بیشتر به فرسایش همراه است و اطلاعات مهمی برای اولویت‌بندی اقدامات کنترل فرسایش در حوزه آبخیز یا مناطق مشابه فراهم می‌کند.

عامل مدیریت پوشش گیاهی (C)

عامل پوشش زمین (C) وابسته به نوع کاربری زمین بوده و به طور قابل توجهی تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی برای کاهش فرسایش قرار دارد (Ozsahin, Dura & Eroglu, 2018). محاسبه عامل پوشش زمین در یک حوزه آبخیز بزرگ به دلیل تنوع مکانی و پیچیدگی الگوهای پوشش زمین می‌تواند چالش برانگیز باشد.

عامل حفاظت خاک (P)

عامل اقدامات حفاظتی به درصد فرسایش خاک در مقایسه با کشت در جهت شیب پس از اتخاذ اقدامات حفاظتی خاک و آب اشاره دارد. مقدار P بین ۰ تا ۱ متغیر است. اگر مقدار ۰ باشد، منطقه تحت تأثیر فرسایش خاک قرار ندارد؛ اگر مقدار ۱ باشد، منطقه هیچ‌گونه اقدام حفاظتی خاک و آب را تجربه نکرده است (Zeng et al., 2017). بررسی میدانی اقدامات حفاظتی خاک و آب زمان‌بر و پرزحمت است. بنابراین، در این مطالعه تخمین مقدار P با اختصاص مقادیر به انواع کاربری زمین انجام شده است (Lee, Ahn & Im, 2017). مدل RUSLE عامل P را برای نشان دادن تأثیر ترکیبی پوشش زمین، اقدامات حمایتی، نوع کاربری زمین، طول شیب، و تنظیمات سفارشی بر فرسایش خاک در نظر می‌گیرد. از قابلیت‌های Google Earth Engine (GEE) برای تحلیل‌های مقیاس‌پذیر و مبتنی بر سنجش از دور استفاده می‌شود تا این روش‌شناسی را در چارچوب GEE تطبیق دهند. درGEE، عامل P با تعریف یک

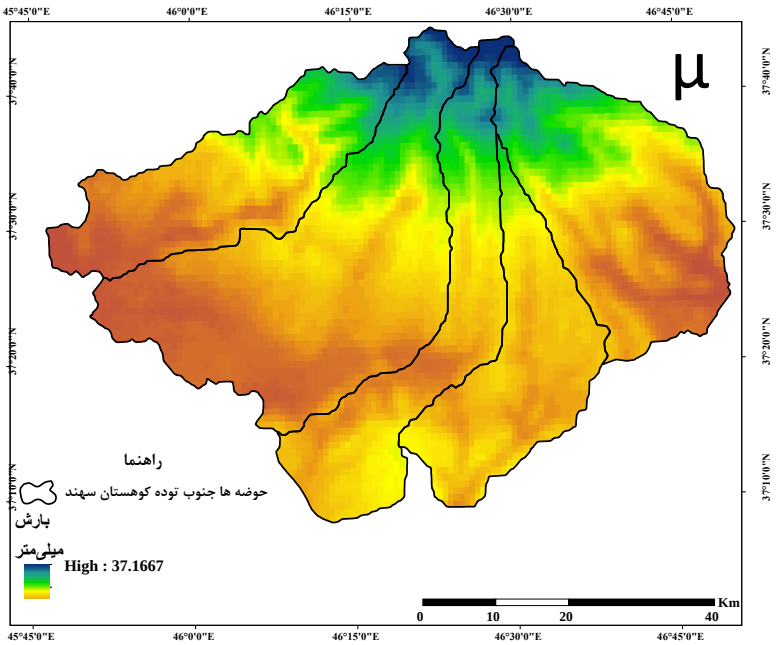
تابع برای استخراج باندها یا ویژگی‌های مرتبط با پوشش زمین (C)، اقدامات حمایتی (M) ، کاربری زمین (L) ، طول شیب (S) و تنظیمات سفارشی محاسبه می‌شود. با اعمال فرمول RUSLE به صورت پیکسلی، مجموعه‌های تصویری مربوط به هر عامل ترکیب شده و یک تصویر برای عامل P تولید می‌شود. قابلیت‌های مقیاس‌پذیر و سنجش از دور GEE کارایی پردازش داده‌های جغرافیایی در مقیاس بزرگ را افزایش داده و امکان ارزیابی جامع حساسیت به فرسایش خاک را فراهم می‌کند. اطمینان از وجود مجموعه‌های تصویری و باندهای لازم در محیط GEE برای محاسبات دقیق عامل P بسیار مهم است. هدف نهایی این است که با استفاده از این رویکرد مبتنی بر GEE ، تصمیم‌گیری آگاهانه در مدیریت زمین صورت گیرد، عامل P به حداقل برسد، و اقدامات پایدار برای کاهش فرسایش خاک ترویج شود.

نتایج و بحث

برآورد میزان فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE

عامل فرسایندگی باران (R)

توزیع مکانی عامل فرسایندگی بارش با استفاده سامانه GEE استخراج شد. در این پژوهش با استفاده از داده‌های بارش (Open LandMap Precipitation) در سامانه GEE نقشه میانگین بارش سالانه تهیه شد. بیش‌ترین بارش منطقه در مناطق بالادست حوضه‌های مورد مطالعه که برابر با ۳۷/۱۶ ملی‌متر و کم‌ترین میزان بارش برابر با ۱۹/۳۳ میلی‌متر در مناطق دشت و پایین دست حوضه‌های دامنه‌های مورد مطالعه مشاهده شد (شکل ۲).

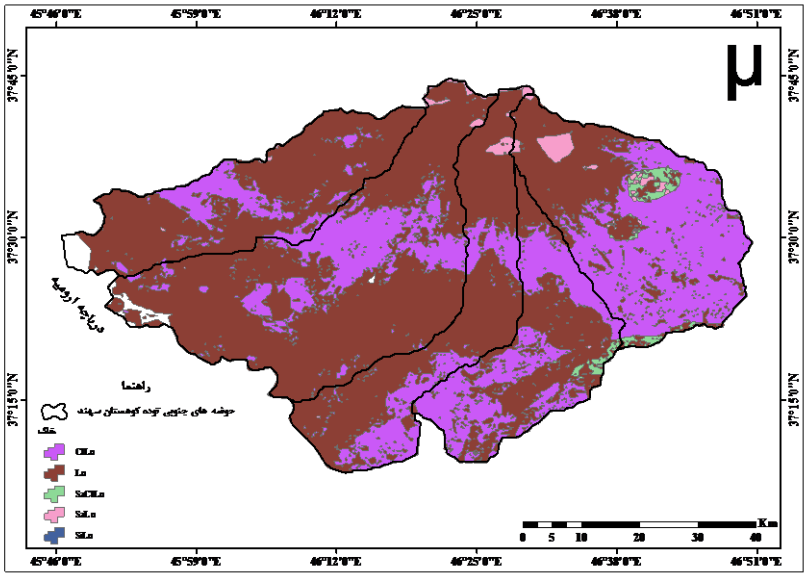


شکل۲- نقشه عامل R در حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

Fig.2. R-factor map in the southern slope basins of the Sahand mountain range

عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)

در این پژوهش از داده‌های خاک که در ۶ کلاس بر اساس عمق (۰، ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سانتی متر) در سامانه GEE موجود است از باند ۰ که در ۱۲ کلاس تهیه شده و خاک‌های سطحی را شامل می‌شود استفاده شد (شکل ۳).



شکل۳- نقشه عامل K در حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

Fig.3. K-factor map in the southern slope basins of the Sahand mountain range

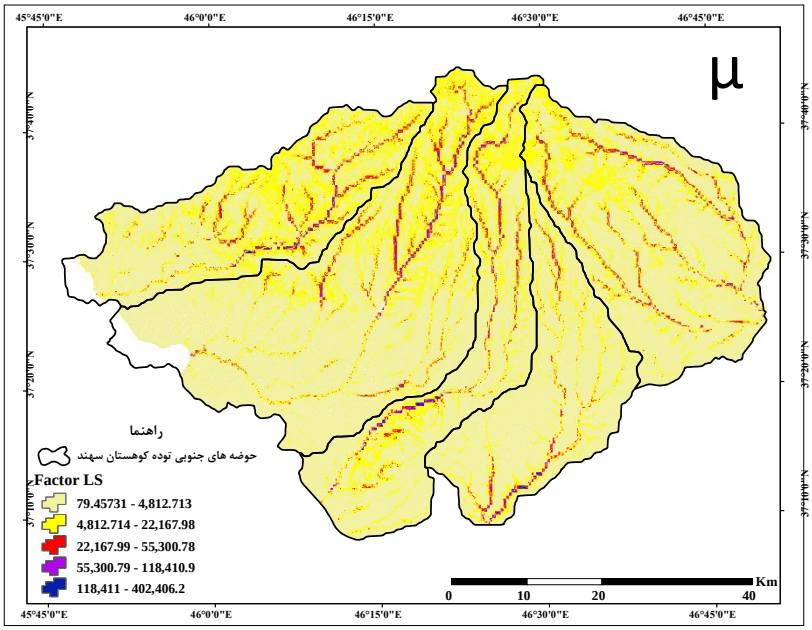
عامل توپوگرافی (LS)

براساس نقشه عامل LS حداقل مقدار شاخص برابر با ۴۰۲/۴۰ می‌باشد که، بیشتر مناطق با شیب‌های کم و هموار را شامل می‌شود. حداکثر آن نیز برابر با ۴۰۲/۴۰ بوده که مناطق با دامنه‌های شیب‌دار و پرتگاه‌ها را شامل می‌شود. شکل ۴ تصویر گرفته شده توسط نگارندگان می‌باشد (شکل ۵).



شکل۴- نمایی از منطقه پرشیب و پوشش گیاهی تنک در محدوده موزد مطالعه

Fig.4. Steep slopes with sparse vegetation within the study area



شکل۵- نقشه عامل LS در حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

Fig.5. LS-factor map in the southern slope basins of the Sahand mountain range

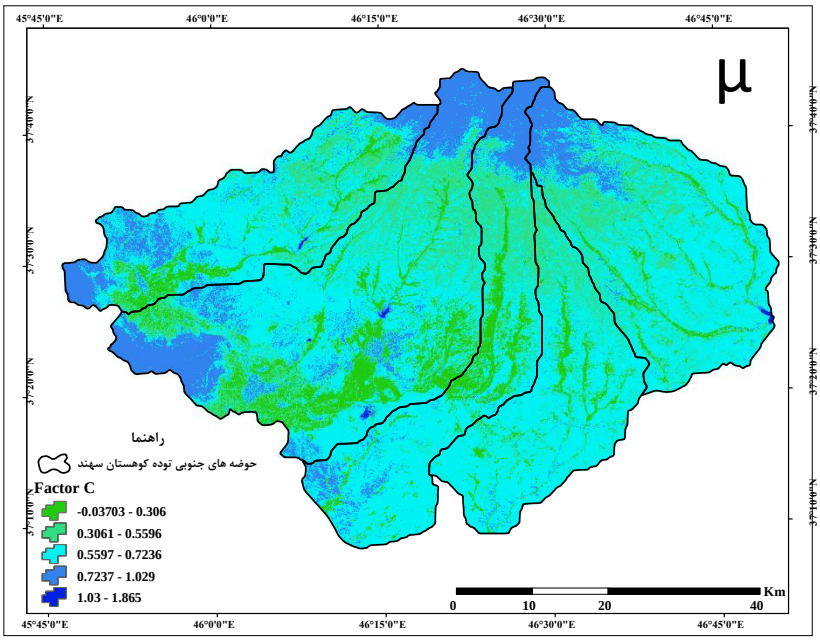
عامل مدیریت پوشش گیاهی (C)

مقدار این عامل در حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند بین ۰/۰۳- تا ۱/۸۶ متغیر بوده است که میانگین آن برابر با ۰/۵۸ بوده است. شکل ۷ نقشه عامل C را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. که بیش‌ترین مقدار این پارامتر در مناطق بالادست حوضه‌ها و مناطق بدون پوشش گیاهی یا دارای پوشش گیاهی ناچیز بوده است و کم‌ترین آن نیز در مناطق بوده که دارای پوشش گیاهی متراکم است. همچنین شکل شماره ۶ تصویر واقعی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد که پوشش گیاهی در مناطق بالادست بسیار تنک می‌باشد.



شکل ۶- پوشش‌گیاهی تنک در مناطق بالا دست محدوده مورد مطالعه

Fig.6. Sparse vegetation in the upper areas of the study area

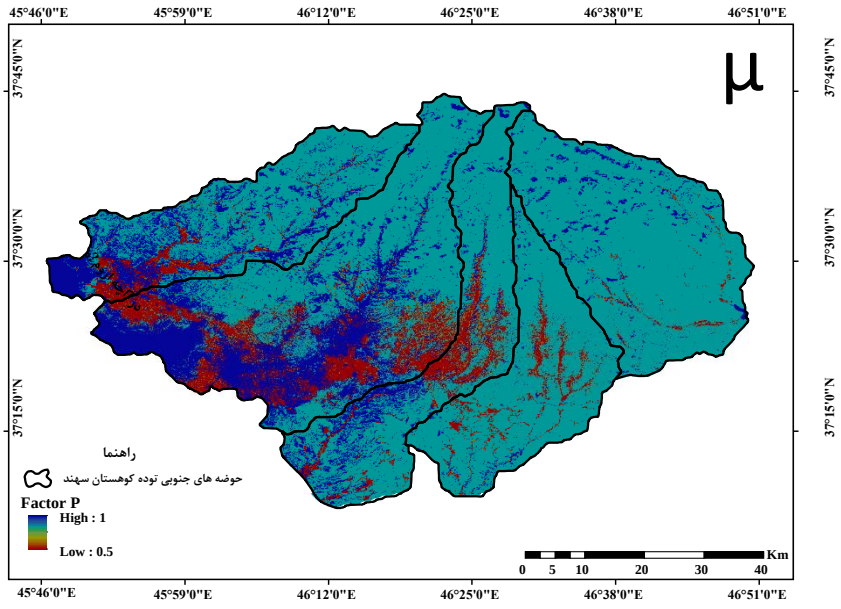


شکل ۷- نقشه عامل **C** در حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

Fig.7. C-factor map in the southern slope basins of the Sahand mountain range

عامل عملیات حفاظتی خاک (P)

این عامل از طریق طبقه بندی نقشه کاربری اراضی تهیه گردید. مقادیر این عامل بین صفر تا ۱ می‌باشد و نقشه شکل ۸ این عامل را نشان می‌دهد.

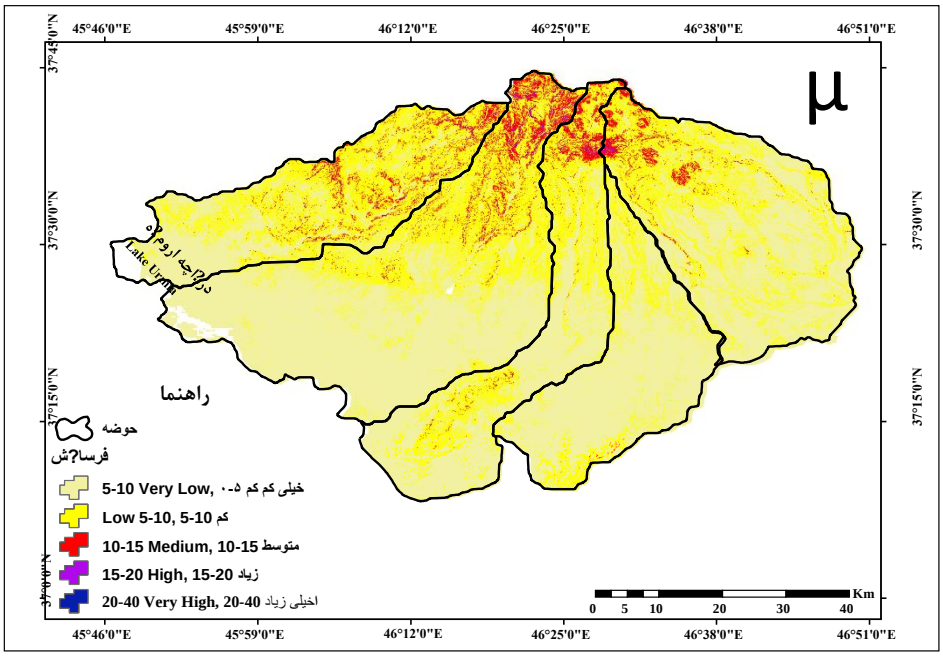


شکل ۸- نقشه عامل P در حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

Fig.8. P-factor map in the southern slope basins of the Sahand mountain range

فرسایش خاک

متوسط فرسایش خاک از طریق حاصل ضرب عامل فرسایندگی باران (R)، فرسایشپذیری خاک (K)، عامل توپوگرافی (LS)، عامل مدیریت پوشش گیاهی (C) و عامل عملیاتی حفاظتی خاک (P) با استفاده از مدل RUSLE در محیط سامانه GEE محاسبه شد که در شکل ۹ نشان داده شده است. مقادیر فرسایش خاک در محدوده مورد مطالعه بین ۰ تا ۴۰ تن در هکتار در سال در سطح یک پیکسل متغیر می‌باشد. نقشه فرسایش در ۵ کلاس خطر (بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) طبقه‌بندی شده است. مساحت و درصد هریک از کلاس‌های خطر در جدول ۱ ارائه شده است. براین اساس بخش عمده‌ای از حوضه ۶۲/۳۵ جزء طبقه فرسایشی خیلی کم می‌باشد. طبقات بعدی به ترتیب ۳۳/۱۹ درصد در طبقه کم، ۳/۹۹ درصد در طبقه متوسط، ۰/۴۲ درصد در طبقه زیاد و ۰/۰۳ درصد در طبقه فرسایشی خیلی زیاد قرار گرفته است. طبقات خیلی زیاد و زیاد منطبق بر دامنه‌های پرشیب، ارتفاعات و مناطقی که تجمع جریان آبراهه‌ها زیاد است را شامل می‌شود. طبقات متوسط، کم و خیلی کم نیز در دامنه‌های با شیب کم ، مناطق هموار و دشت‌ها را شامل می‌شود (شکل ۹).



شکل ۹- نقشه فرسایش خاک در حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

Fig.9. Soil erosion map in the southern slope basins of the Sahand mountain range

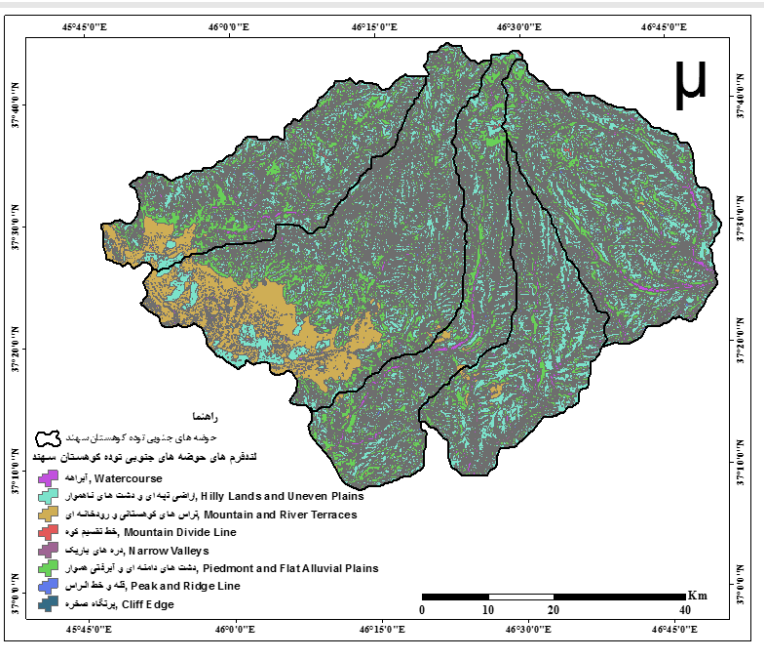
جدول ۱- مساحت و درصد مساحت طبقات فرسایش خاک براساس مدل RUSLE در حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

Table 1 - Area and percentage of soil erosion classes based on the RUSLE model in the southern slope basins of the Sahand mountain range

طبقات Classes	پهنه‌های فرسایش Erosion Zones	مساحت (Km^2) Area	درصد مساحت Percentage of Area
0-5	خیلی کم Very Low	2364.49	62.35
5-10	کم Low	1258.62	33.19
10-15	متوسط Medium	151.46	3.99
15-20	زیاد High	16.10	0.42
20-40	خیلی زیاد Very High	1.23	0.03

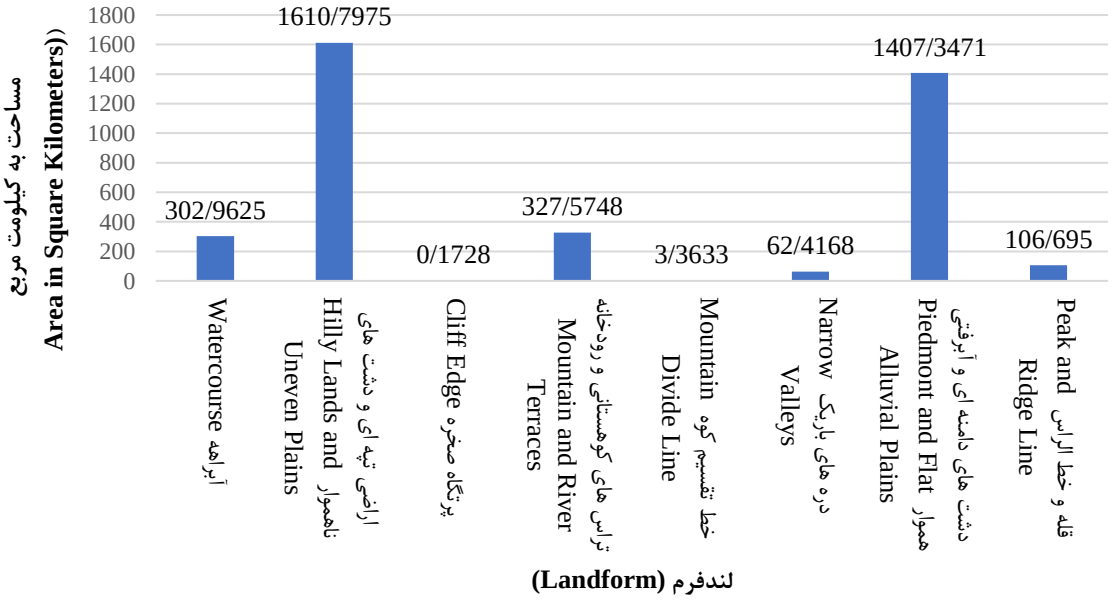
آشکارسازی لندفرم‌های حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

مجموعه داده ALOS Landform کلاس‌های شکل زمین را ارائه می‌کند که با ترکیب شاخص بار حرارتی پیوسته ALOS CHILI و شاخص موقعیت توپوگرافی چند مقیاسی ALOS MTPI ایجاد شده‌اند. این شاخص بر اساس داده‌های مدل رقومی ارتفاعی آلوس ۳۰ متری در سامانه GEE کد نویسی شده است به این منظور با استفاده از پروداکت لندفرم چند مقیاسه آلوس، برای حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند کدنویسی این پروداکت انجام شد و نقشه لندفرم حوضه‌ها استخراج گردید برای طبقه‌بندی بهتر می‌توان در بین کلاس‌ها نیز طبقه‌بندی به صورت دستی انجام داد تا یک طبقه‌بندی بهینه برای چشم انداز منطقه ایجاد شود (Negahban & Mokarram, 2015). طبقه‌بندی مجدد با استفاده از کلاس‌های طبقه‌بندی نقشه تولید شده و ویژگی‌های ژئومورفولوژی حوضه‌ها در محیط نرم افزار ArcGIS شکل ۱۰ انجام شد تعداد هشت کلاس در این طبقه‌بندی مشخص شد که لندفرم‌های (اراضی تپه‌ای و دشت‌های مرتفع ناهموار) مربوط به شیب‌های بالایی و (تراس‌های کوهستانی، رودخانه‌ای و دره‌های باز) مربوط به شیب‌های پایینی حوضه‌های مورد مطالعه را پوشش داده‌اند. در این محدوده مورد مطالعه لندفرم اراضی تپه‌ای و دشت‌های ناهموار ۴۲/۱۵ درصد، دشت‌های دامنه‌ای و آبرفتی هموار ۳۶/۸۲ درصد، تراس‌های کوهستانی و رودخانه‌ای ۸/۵۷ درصد، آبراهه ۷/۹۲ درصد، قله و خط‌الرأس ۲/۷۹ درصد، دره‌های باریک ۱/۶۳ درصد، خط تقسیم کوه ۰/۰۸ درصد و پرتگاه و صخره ۰/۰۰۴ درصد را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۱۱).



شکل ۱۰- نقشه طبقه‌بندی لندفرم‌های حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

Fig.10. Landform classification map of the southern slope basins of the Sahand mountain range



شکل ۱۱- نمودار مساحت لندفرم‌های حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

Fig.11. Area chart of landforms in the southern slope basins of the Sahand mountain range

نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی تأثیرات لندفرم‌ها بر فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE و با بهره‌گیری از پلتفرم پیشرفته Google Earth Engine (GEE)، روش‌های نوینی برای ارزیابی و مدل‌سازی فرسایش خاک در مقیاس‌های وسیع ارائه داده است. نتایج تحقیق نشان داد که ویژگی‌های لندفرم، به‌ویژه شیب، ارتفاع و نوع پوشش گیاهی، تأثیر قابل توجهی بر شدت فرسایش خاک دارند. در این راستا، مناطق با شیب‌های تند و پوشش گیاهی ضعیف به‌طور مشخصی در معرض فرسایش بیشتری قرار داشتند. از جنبه‌ای دیگر، استفاده از Google Earth Engine به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای پردازش داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل‌های پیچیده، این امکان را فراهم آورد که به‌طور دقیق و در مقیاس وسیع، فرسایش خاک ارزیابی شود. این پلتفرم توانست تحلیل‌های زمانی و مکانی پیچیده را با دقت میلی‌متری انجام دهد و به‌ویژه در مناطقی که داده‌های زمینی کمیاب یا دسترسی به اطلاعات محدود بود، امکان ارزیابی دقیق فرسایش خاک را فراهم کند. استفاده از تکنیک‌های نوین و مدل RUSLE در این مطالعه به‌کار گرفته شد که به‌طور مؤثری در پیش‌بینی و شبیه‌سازی تغییرات فرسایش خاک در طول زمان کمک کرد.

یافته‌ها همچنین نشان داد که پوشش گیاهی به‌ویژه در مناطق با شیب‌های شدید، نقش مؤثری در کاهش فرسایش خاک ایفا می‌کند. در مناطقی با پوشش گیاهی سالم، میزان فرسایش خاک به‌طور قابل توجهی کمتر از نواحی با پوشش گیاهی ضعیف بود. این نکته بر اهمیت حفاظت از پوشش گیاهی و برنامه‌ریزی‌های کشاورزی و محیط‌زیستی برای جلوگیری از تخریب خاک تأکید می‌کند. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که فرسایش خاک در برخی مناطق با شیب‌های تند و در نزدیکی رودخانه‌ها بیشتر است، و این امر از لحاظ مدیریتی اهمیت ویژه‌ای دارد. علاوه بر این، بررسی‌های پیش‌بینی‌ای که با استفاده از داده‌های موجود انجام شد، حاکی از افزایش ریسک فرسایش خاک در آینده، به‌ویژه در مناطق با تغییرات اقلیمی و مدیریت ناکافی منابع طبیعی است. این مطالعه علاوه بر ایجاد آگاهی درباره تأثیر لندفرم‌ها و پوشش گیاهی بر فرسایش خاک، نشان‌دهنده قابلیت‌های گسترده Google Earth Engine در تحلیل و مدل‌سازی فرسایش خاک به‌ویژه در مقیاس‌های وسیع و با دقت بالا است. این روش‌ها می‌توانند به‌طور مؤثر در توسعه استراتژی‌های مدیریت خاک و برنامه‌های حفاظتی برای مقابله با فرسایش خاک در مناطق آسیب‌پذیر به‌کار گرفته شوند. در نهایت، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های تحلیلی در ترکیب با Google Earth Engine، مسیر جدیدی را برای پژوهش‌های آینده در زمینه ارزیابی و مدیریت فرسایش خاک و حفاظت از منابع طبیعی باز می‌کند. این روش‌ها می‌توانند به‌ویژه در مناطقی که داده‌های میدانی محدود یا دسترسی به مناطق مشکل است، جایگزینی مؤثر برای روش‌های سنتی ارزیابی فرسایش خاک باشند.

همچنین این نتیجه با نتایج آرخی و بارانی (Arekhi & Barani, 2022) مقایسه مدل RUSLE و EPM در برآورد فرسایش و عابدینی و همکاران (Abedini, Piroozi & Faal Naziri, 2023) بررسی اثرات تغیر کاربری اراضی بر فرسایش و کرمی و همکاران (Karami et al., 2023) نقش لندفرم و لیتولوژی در برآورد فرسایش خاک، منطبق می‌باشد. طبق نتایج این پژوهش، قابلیت سامانه GEE در استخراج لندفرم و محاسبه مدل RUSLE در برآورد میزان فرسایش خاک بصورت مفید و مؤثر می‌باشد و می‌تواند در اجرای عملیات آبخیزداری و حفاظت خاک توسط مسئولین مورد استفاده قرار گیرد.

سپاسگزاری

از کسانی که در تهیه داده‌ها و کلیه مسئولین محترم مجله که در مراحل تهیه و تنظیم محله زحمات بی‌شائبه‌ای را تقبل می‌فرمایند، کمال تشکر و قدردانی را می‌نماییم.

References

Abedini, M., & Sadeghi, A. (2024). Zoning of Erosion Intensity Using the RUSLE Model in the GEE System Case Study: Mardaghchay Basin, East Azerbaijan). Paper presented at the Proceedings of the 10th Conference of the Iranian Geomorphology Association, Tehran, Iran.

Abedini, M., Piroozi, E., & Faal Naziri, M. (2023). Investigating the Impacts of land use changes on soil erosion in Givi City using the MABAC multi-criteria decision-making model and Landsat satellite images (OLI-TM sensors). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *12*(4), 1-26. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.73137.1121

Arekhi, S., & Barani, S. (2024). Comparison of EPM and RUSLE models in estimating erosion and sediment production using GIS (Case study: Chamgardalan watershed of Ilam province). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(2), 339-371. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75260.1176

Cao, Z., Fang, Z., Yao, & Xiong, L. (2020). Loess Landform Classification Based on Random Forest. *Journal of Geo-Information Science*, *22*(3), 452-463. http://dx.doi.org/10.12082/dqxxkx.2020.190247

Das, S., Bora, P. K., & Das, R. (2022). Estimation of slope length gradient (LS) factor for the sub-watershed areas of Juri River in Tripura. *Modeling Earth Systems and Environment*, *8*(1), 1171–1177. https://doi.org/10.1007/s40808-021-01153-0

Diodato, N. (2004). Estimating RUSLE's rainfall factor in the part of Italy with a Mediterranean rainfall regime. *Hydrology and Earth System Sciences*, *8*(1), 103–107. https://doi.org/10.5194/hess-8-103-2004

Draguț, L., & Eisank, C. (2011). Automated object-based classification of topography from SRTM data. *Geomorphology*, *141*, 21–33. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.001

Du, L., You, X., Li, K., Meng, L., Cheng, G., Xiong, L., & Wang, G. (2019). Multi-modal deep learning for landform recognition. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *158*, 63–75. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.09.018

Evans, I. S. (2012). Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? *Geomorphology*, *137*(1), 94–106. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.029

Florinsky, I., Eilers, R., Manning, G., & Fuller, L. (2002). Prediction of soil properties by digital terrain modelling. *Environmental Modelling & Software*, *17*(3), 295–311. https://doi.org/10.1016/s1364-8152(01)00067-6

Gao, Y., Yang, J., Chen, X., Wang, X., Li, J., Azad, N., … & He, H. (2024). Using advanced INSAR techniques and machine learning in Google Earth Engine (GEE) to monitor Regional Black Soil Erosion—A Case study of Yanshou County, Heilongjiang Province, northeastern China. *Remote Sensing, 16*(20), 3842. https://doi.org/10.3390/rs16203842

Hoersch, B., Braun, G., & Schmidt, U. (2002). Relation between landform and vegetation in alpine regions of Wallis, Switzerland. A multiscale remote sensing and GIS approach. *Computers Environment and Urban Systems*, *26*(2–3), 113–139. https://doi.org/10.1016/s0198-9715(01)00039-4

Hua, T., Zhao, W., Liu, Y., & Liu, Y. (2019). Influencing factors and their interactions of water erosion based on yearly and monthly scale analysis: A case study in the Yellow River basin of China. *Nat. Hazards Earth*. https://doi.org/10.5194/nhess-2019-122

Karami, F., & Bayati Khatibi, M. (2019). The Modeling of Soil Erosion and Prioritizing Sediment Production in Sattarkhan Dam Basin Using MUSLE and SWAT Models, *Hydrogeomorphology*, *6*(18), 115-137. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23833254.1398.6.18.7.6

Karami, F., Mokhtari, D., & Ahmadi, F. (2023). The role of landforms and lithology in the rate of soil erosion in Zonuzchay catchment. *Hydrogeomorphology*, *10*(37), 1–24. [In Persian] https://doi.org/10.22034/hyd.2023.53806.1660

Lee, E., Ahn, S., & Im, S. (2017). Estimation of soil erosion rate in the Democratic People's Republic of Korea using the RUSLE model. *Forest Science and Technology, 13*(3), 100–108. https://doi.org/10.1080/21580103.2017.1341435

Li, S., Xiong, L., Tang, G., & Strobl, J. (2020). Deep learning-based approach for landform classification from integrated data sources of digital elevation model and imagery. *Geomorphology*, *354*, 107045. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107045

Mokarram, M., & Sathyamoorthy, D. (2018). A review of landform classification methods. *Spatial Information Research*, *26*(6), 647–660. https://doi.org/10.1007/s41324-018-0209-8

Musa, J., Anijofor, S., Obasa, P., & Avwevuruvwe, J. (2017). Effects of soil physical properties on erodibility and infiltration parameters of selected areas in Gidan Kwano. *Deleted Journal*, *12*(1), 46. https://doi.org/10.4314/njtr.v12i1.8

Nam, K., Lee, D., Chung, S., & Jeong, G. (2014). Effect of rainfall intensity, soil slope and geology on soil erosion. *The Journal of Engineering Geology*, *24*(1), 69–79. https://doi.org/10.9720/kseg.2014.1.69

Negahban, S., & Mokarram, M. (2015). Landform Classification using Topography Position Index and relationship between it and characteristics of geology (Case Study: Hakan Watershed, Jahrom City). *Environmental Erosion Research, 5*(1), 75-89. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22517812.1394.5.1.5.1

Ozsahin, E., Duru, U., & Eroglu, I. (2018). Land Use and Land Cover Changes (LULCC), a key to understand soil erosion intensities in the Maritsa Basin. *Water*, *10*(3), 335. https://doi.org/10.3390/w10030335

Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., & Alewell, C. (2014). Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. *The Science of the Total Environment*, *479*, 189–200. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.010

Parveen, R., & Kumar, U. (2012). Integrated Approach of Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil loss risk assessment in Upper South Koel Basin, Jharkhand. *Journal of Geographic Information System*, *04*(06), 588–596. https://doi.org/10.4236/jgis.2012.46061

Petito, M., Cantalamessa, S., Pagnani, G., Degiorgio, F., Parisse, B., & Pisante, M. (2022). Impact of conservation agriculture on soil erosion in the annual cropland of the Apulia region (Southern Italy)

based on the RUSLE-GIS-GEE framework. *Agronomy*, *12*(2), 281. https://doi.org/10.3390/agronomy12020281

Pfeffer, K., Pebesma, E. J., & Burrough, P. A. (2003). Mapping alpine vegetation using vegetation observations and topographic attributes. *Landscape Ecology*, *18*(8), 759–776. https://doi.org/10.1023/b:land.0000014471.78787.d0

Sentani, A., Niam, M. F., & Boogaard, F. (2024). Probability of erosion utilizing Google Earth engine and the RUSLE method in the Tuntang watershed. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, *1321*(1), 012001. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1321/1/012001

Sepahvand, A. R., Ahmadi, H., Nazari Samani, A. A., & FeyzNiya, S. (2018). Landforms classification by Topographic Position Index and assessment of the relation between landforms and lithological features. *Researches in Earth Sciences*, *9*(1), 30-45. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20088299.1397.9.1.3.8

Shang, R., Peng, P., Shang, F., Jiao, L., Shen, Y., & Stolkin, R. (2020). Semantic segmentation for SAR image based on texture complexity analysis and key superpixels. *Remote Sensing*, *12*(13), 2141. https://doi.org/10.3390/rs12132141

Shen, H., Zheng, F., Wen, L., Han, Y., & Hu, W. (2016). Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope. *Soil and Tillage Research*, *155*, 429–436. https://doi.org/10.1016/j.still.2015.09.011

Sud, A., Sajan, B., Kanga, S., Singh, S. K., Singh, S., Durin, B., … & Chand, K. (2024). Integrating RUSLE Model with Cloud-Based Geospatial Analysis: A Google Earth Engine Approach for Soil Erosion Assessment in the Satluj Watershed. *Water*, *16*(8), 1073. https://doi.org/10.3390/w16081073

Summerfield, M. A. (2014). *Global Geomorphology*. London: Routledge.

Trevisani, S., & Rocca, M. (2015). MAD: robust image texture analysis for applications in high resolution geomorphometry. *Computers & Geosciences*, *81*, 78–92. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.04.003

Verhagen, P., & Drăguţ, L. (2012). Object-based landform delineation and classification from DEMs for archaeological predictive mapping. *Journal of Archaeological Science*, *39*(3), 698–703. https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.11.001

Wang, Z., & Su, Y. (2020). Assessment of soil erosion in the Qinba mountains of the southern Shaanxi province in China using the RUSLE model. *Sustainability*, *12*(5), 1733. https://doi.org/10.3390/su12051733

Xiong, L., Tang, G., Yang, X., & Li, F. (2021). Geomorphology-oriented digital terrain analysis: Progress and perspectives. *Journal of Geographical Sciences,* *31*(3), 456–476. https://doi.org/10.1007/s11442-021-1853-9

Xiong, L., Zhu, A., Zhang, L., & Tang, G. (2018). Drainage basin object-based method for regional-scale landform classification: a case study of loess area in China. *Physical Geography*, 1–19. https://doi.org/10.1080/02723646.2018.1442062

Zawawi, A. A., Shiba, M., & Jemali, N. J. N. (2014). Landform classification for site evaluation and forest planning: integration between scientific approach and traditional concept. *Sains Malaysiana*, *43*(3), 349–358. http://www.ukm.my/jsm/pdf_files/SM-PDF-43-3-2014/04%20Azita%20Ahmad.pdf

Zeng, C., Wang, S., Bai, X., Li, Y., Tian, Y., Li, Y., … & Luo, G. (2017). Soil erosion evolution and spatial correlation analysis in a typical karst geomorphology using RUSLE with GIS. *Solid Earth*, *8*(4), 721–736. https://doi.org/10.5194/se-8-721-2017

Zhang, H., Wei, J., Yang, Q., Baartman, J. E., Gai, L., Yang, X., ... & Geissen, V. (2017). An improved method for calculating slope length (λ) and the LS parameters of the Revised Universal Soil Loss Equation for large watersheds. *Geoderma*, *308*, 36–45. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.006

Zhang, H., Zhou, C., Lv, G., Wu, Z., Lu, F., Wang, J., ... & Qin, C. (2020). The Connotation and Inheritance of Geo-information Tupu. *Journal of Geo-information Science*, *22*(4), 653-661. https://doi.org/10.12082/dqxxkx.2020.200167

Vol.14, No.2, Summer 2025, p.245-265 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2025.92683.1560 OPEN ACCESS

Analysis of the Relationship Between Landslide Susceptibility and the Intensity of Soil Erosion and Sediment Yield (Case Study: Darabkola Watershed, Mazandaran Province)

Samaneh Yosefi [1], Eisa Jokar Sarhangi [2*], Reza Esmaeili [3]

[1]M.A. of Environment Hazards, Faculty of Humanities, University of Mazandaran, Babolsar, Iran
[2 & 3]Associate Professor of Geomorphology, Faculty of Humanities, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 16 March 2025

Revised: 09 May 2025

Accepted: 18 May 2025

Available Online: 18 May 2025

Keywords:

Landslide Susceptibility

Sediment Yield Modeling

Erosion Assessment

Statistical Analysis (ANOVA)

Darabkola Watershed

ABSTRACT

Landslides are significant geomorphic hazards that contribute to both terrain instability and increased erosion and sediment production. In Iran, most studies have focused on landslide hazard zonation, with relatively little attention given to their role in sediment dynamics. This study aims to assess the relationship between landslide susceptibility and erosion intensity, as well as their effect on sediment yield in the Darabkola watershed, Mazandaran Province. A landslide susceptibility map was produced using the Frequency Ratio (FR) model, by integrating factors such as lithology, elevation, slope, aspect, land use, and distance from roads and streams. The model showed high predictive accuracy (p = 0.99). Erosion intensity was estimated using the MPSIAC and RUSLE models, with results validated by the BLM model and statistical indicators. The MPSIAC model, due to its higher accuracy, was used to quantify sediment yield across landslide susceptibility classes. ANOVA results revealed significant differences in sediment yield among classes, with the highest sediment production (61.35 tons/ha/year) observed in areas of very high landslide susceptibility. These findings highlight the importance of integrating landslide impacts into erosion and sediment yield models for improved prediction and effective watershed management.

*Corresponding author: Dr. Eisa Jokar Sarhangi E-mail address: e.jokar@umz.ac.ir

How to cite this article: Yosefi, S., Jokar Sarhangi, E., & Esmaeili, R. (2025). Analysis of the Relationship Between Landslide Susceptibility and the Intensity of Soil Erosion and Sediment Yield (Case Study: Darabkola Watershed, Mazandaran Province). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(2), 245-265. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.92683.1560

©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

Two of the eight main soil degradation processes worldwide are soil erosion and landslides. Landslides, as environmental hazards, have significant negative impacts on ecosystems. In Iran, studies on landslides have primarily focused on hazard zonation, with limited attention given to their role in exacerbating erosion and increasing sediment yield in basins. Furthermore, most methods and models developed for assessing erosion and sediment yield do not account for the role of landslides. Additionally, studies evaluating the impact of landslides on sediment yield have often relied on data from hydrometric stations. However, not all material displaced by landslides is transported into the drainage network; some of it remains on slopes. Moreover, sediment measurement data is often unavailable for many basins.

The study area, the Darabkola watershed in Mazandaran Province, is highly susceptible to landslides due to its weak and tectonically active formations, as well as significant land-use changes. Therefore, landslide hazard zonation and its relationship with sediment yield are essential for better watershed management. The aim of this study is to evaluate the relationship between landslides and erosion intensity, as well as their impact on sediment yield in the Darabkola watershed.

Material and Methods

In this study, landslides in the Darabkola watershed were first investigated, and their frequency was determined by integrating factor maps including lithology, elevation, slope, aspect, land use, distance from roads, and distance from streams. For landslide zonation and determining the weight of influencing factors, the Area Density Model was used, and its evaluation was performed using the Empirical Probability (P) equation.

To determine the sediment yield from landslides, erosion class maps of the watershed were prepared using the MPSIAC and RUSLE models. The accuracy of these models was evaluated using the BLM model, which is based on field observations, as a reference map. A point layer with a regular grid was created for sampling at 1,204 points from the maps generated by these models. Based on these sampling points, statistical indices such as RMSE, MAE, MSE, and NSEC were calculated.

Following model evaluation, the landslide zonation map was overlaid with the sediment yield map, and the relevant data were extracted for analysis. The collected data were then analyzed using one-way ANOVA.

Results and Discussion

The results of overlaying the landslide distribution map with the factor maps indicate that conglomerate, marl, sandstone, and siltstone (Plcm), with a landslide area density of 0.634; slopes of 15–25% (0.127); southwest aspect (0.117); elevation of 150–300 meters (0.228); distance of 150–300 meters from streams (0.165); distance of 150–300 meters from roads (0.273); and rainfed agricultural land use (0.304) are associated with the highest landslide susceptibility.

After calculating the weight of each factor class influencing landslides, the weighted maps were combined, and a landslide susceptibility map was prepared using the Area Density Model. Its accuracy evaluation using the Empirical Probability equation confirmed the high accuracy of the zonation map ($p = 0.99$).

To determine the sediment yield related to landslides, erosion class maps were created using the MPSIAC and RUSLE models. The accuracy of these maps was assessed using the BLM model and the statistical indices mentioned. The results showed that the MPSIAC model had superior performance. Consequently, the sediment yield map derived from the MPSIAC model was overlaid with the landslide susceptibility map to estimate sediment yield for each susceptibility class.

The highest sediment yield in the Darabkola watershed was observed in the very high and high landslide susceptibility classes, with values of 61.35 and 53.42 tons/ha/year, respectively. To examine the significance of variations in sediment yield across different landslide susceptibility classes, one-way ANOVA was used. The results indicated a statistically significant relationship between sediment yield and

landslide susceptibility, confirming that erosion and sediment yield vary substantially across the landslide susceptibility classes.

Conclusion

In this study, landslide distribution in the Darabkola watershed was evaluated by integrating maps of lithology, elevation, slope, aspect, land use, and distances from roads and streams with existing landslide data. The Area Density Model was used to calculate the weighted values of each factor class, and the evaluation confirmed the high accuracy of the resulting landslide susceptibility map.

Subsequently, the erosion intensity map was produced using the MPSIAC and RUSLE models, and validated against the BLM model. Due to its higher accuracy, the MPSIAC model was used to assess sediment yield across landslide susceptibility classes. The ANOVA results confirmed that sediment yield increases significantly with landslide susceptibility, and areas with very high susceptibility exhibited the greatest sediment production.

The findings underscore the importance of integrating landslide impacts into erosion and sediment yield models. The significant contribution of high-susceptibility areas to sediment yield highlights the urgent need for targeted conservation strategies in the study area. It is also recommended that future sediment and erosion modeling efforts explicitly include landslide dynamics to improve prediction and watershed management outcomes.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۲۶۵-۲۴۵

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2025.92683.1560 دسترسی آزاد

تحلیل رابطه بین حساسیت زمین‌لغزش‌ها با شدت فرسایش و تولید رسوب (مطالعه موردی: حوضه دارابکلا، استان مازندران)

سمانه یوسفی[۱]، عیسی جوکار سرهنگی[۲*]، رضا اسماعیلی[۳]

[۱] کارشناسی ارشد مخاطرات محیطی، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران
[۲و۳] دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸

کلمات کلیدی:
حساسیت زمین‌لغزش
مدلسازی تولید رسوب
ارزیابی فرسایش
تحلیل آماری(ANOVA)
حوضه آبریز دارابکلا

چکیده

زمین‌لغزش‌ها از مهم‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیک به‌شمار می‌روند که موجب ناپایداری زمین و افزایش فرسایش و تولید رسوب می‌شوند. در ایران، بیشتر پژوهش‌ها بر پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش تمرکز داشته و نقش آن‌ها در فرآیندهای رسوبی کمتر بررسی شده است. هدف این تحقیق، بررسی رابطه بین حساسیت زمین‌لغزش با شدت فرسایش و تأثیر آن بر رسوب‌دهی در حوضه دارابکلا (استان مازندران) است. نقشه حساسیت زمین‌لغزش با مدل نسبت فراوانی (FR) و با استفاده از لایه‌هایی مانند لیتولوژی، ارتفاع، شیب، جهت، کاربری اراضی و فاصله از جاده و آبراهه تهیه شد که دقت بالایی ($p = 0.99$) داشت. شدت فرسایش با مدل‌های MPSIAC و RUSLE برآورد و با مدل پایه BLM و شاخص‌های آماری اعتبارسنجی شد. مدل MPSIAC به‌دلیل دقت بیشتر، برای تخمین رسوبدهی در کلاس‌های مختلف حساسیت زمین‌لغزش به‌کار رفت. نتایج آزمون ANOVAتفاوت معنی‌دار بین کلاس‌ها را نشان داد و بیشترین رسوب (۶۱.۳۵ تن در هکتار در سال) در مناطق با حساسیت بسیار زیاد رخ داد. این نتایج بر لزوم درنظر گرفتن اثر مستقیم زمین‌لغزش‌ها در مدل‌های فرسایش و رسوب تأکید دارد.

* نویسنده مسئول: دکتر عیسی جوکار سرهنگی
E-mail: e.jokar@umz.ac.ir

مقدمه

دو مورد از هشت فرآیند اصلی تخریب خاک که خاک‌های سراسر جهان با آن مواجه هستند، فرسایش خاک و زمین‌لغزش است. زمین‌لغزش یک تهدید بزرگ در برخی مناطق است که اغلب منجر به اثرات جدی بر جمعیت، اموال و زیرساخت‌ها می‌شود (Tavoularis, 2023). شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش و پهنه‌بندی خطر آن، گامی مهم در ارزیابی مخاطرات محیطی به شمار رفته و در مدیریت حوضه‌ها نقش انکار نشدنی دارد (Lonigro, Gentile & Polemio, 2015)؛ با این حال، اثرات زمین‌لغزش در فرسایش خاک و جابه‌جایی رسوبات، دست کم گرفته شده است. منشأ این رسوبات در مراحل قبل از گسیختگی دامنه‌ای، عمدتاً فرسایش آبی بوده و در هنگام گسیختگی نیز، وقوع زمین‌لغزش و جریان‌های واریزه‌ای است. این عوامل در کنار فرسایش آبی می‌توانند منشأ تولید رسوب در مرحله بعد از گسیختگی نیز به شمار روند (Peyrowan, Shariat Jafari & Lotfollahzadeh, 2017). مطالعه پدیده زمین‌لغزش در ایران بیشتر محدود به پهنه‌بندی و مطالعه خسارات جانی و مالی ناشی از آن بوده است و به نقش زمین‌لغزش‌ها در فرسایش خاک و افزایش بار رسوبی رودخانه‌ها توجه بسیار کمی شده است. هر چند شواهد دال بر این است که میزان رسوب وارده به رودخانه‌های مناطق کوهستانی بر اثر زمین‌لغزش‌ها قابل توجه است، اما از لحاظ کمّی عدد و رقم متقن مبتنی بر تحقیق علمی برای آن ارائه نشده است (Talaei, Shariat Jafarei & Beyrami, 2019). از سوی دیگر، در بیشتر مدل‌هایی که تاکنون برای ارزیابی فرسایش و رسوب حوضه‌ها ارائه شده‌اند (از جمله Fargas، CORINE[1] و FSM[2])، نقش زمین‌لغزش دیده نشده است. در برخی از مدل‌ها (از قبیل EPM[3]، PSIAC[4] و RUSLE[5]) برای اشکال فرسایش آبی از قبیل سطحی، شیاری، آبکندی و یا رودخانه‌ای نقش مستقیم قائل شده‌اند، اما اثر زمین‌لغزش‌ها به طور مستقیم در نظر گرفته نمی‌شوند. از این رو، برآوردهای انجام شده در این مدل‌ها به ویژه در حوضه‌های رسوبی متاثر از زمین‌لغزش‌ها می‌تواند با واقعیت فاصله داشته باشد. با توجه به اهمیت موضوع، تحقیقات مختلفی در مورد زمین‌لغزش و فرسایش و رسوب ناشی از آن انجام شده است. در این راستا، شیرانی و مطهری‌نیا (Shirani & Motaharinia, 2016) به بررسی تأثیر زمین‌لغزش بر میزان تولید رسوب در پادنای سمیرم پرداختند که در آن، نمودارهای لغزش و میزان بارش، دبی و رسوب به روش رگرسیون خطی کل داده‌ها در دو ایستگاه شهید و سرباز به اثبات همبستگی مثبت میان سطح لغزش‌ها و رسوب موجود در حوضه منجر شده است. پیروان و همکاران (Peyrowan et al., 2017) در بررسی تاثیر زمین‌لغزش‌ها بر بار رسوبی رودخانه جاجرود و تحلیل داده‌ها در مقایسه با برآورد مدل نشان دادند که با افزایش درصد نسبی مساحت زمین‌لغزش‌ها از ۰/۷ به ۲/۴ درصد، حدود ۱۱/۵ درصد رسوب‌دهی حوضه بیشتر شده است. همچنین تحلیل داده ها در مقایسه با آمار مشاهده‌ای نشان داد که با افزایش درصد مساحت زمین‌لغزش، میزان تولید رسوب سالانه نیز افزایش می‌یابد. در تحقیقی دیگر عسگری و همکاران (Asgari, Shadfar & Jafari, 2019) به معرفی مدل مناسب رابطه زمین‌لغزش با رسوب در سیستم حوضه آبخیز گل‌گل پرداختند. نتایج تحلیل کمی متغیرها نشان داد که بین شاخص‌های تأثیرگذار زمین‌لغزش بر بار رسوبی در این حوضه، ارتباط غیر خطی حاکم است و مساحت زمین‌لغزش با ضریب تبیین ۰/۸۷ بیشترین تأثیر را بر بار رسوبی در این حوضه دارد. طلایی و همکاران (Talaei et al., 2019) نیز با ارزیابی تأثیر زمین‌لغزش بر بار رسوبی حوضه بالخلوچای در استان اردبیل، میزان رسوب برآوردی در دوره‌های زمانی مختلف را با دوره‌های فعالیت زمین‌لغزش‌ها مورد مقایسه قرار دادند. نتایج تحقیق بیانگر تاثیر زمین‌لغزش‌ها در افزایش فرسایش و رسوب‌دهی حوضه بوده و زمین‌لغزش‌های بزرگ باعث افزایش قابل توجه بار رسوبی رودخانه بالخلوچای شده‌اند. نصیری و همکاران (Nasiri, Mohammadzade, Lotfalian & Parsakhoo, 2022) نیز در پهنه‌بندی و مطالعه میدانی لغزش‌ها در اطراف جاده‌های جنگلی دارابکلا با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی به این نتیجه رسیدند که ۱۳/۲۶ درصد از مساحت منطقه در خطر لغزش

1- Coordinate Information on the Environment
2-Factorial Scoring Model
3- Erosion Potential Method
4- Pacific Southwest Inter-Agency Committee
5- Revised Universal Soil Loss Equation

زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته‌اند. فتحی گنجی (Fathi Ganji, 2023) در پژوهشی در حوضه کاکاشرف لرستان، نقش ویژگی‌های ژئومورفیک در حساسیت زمین به لغزش و تأثیر آن بر تولید رسوب را مورد بررسی قرار دادند. هم‌پوشانی نتایج مدل‌ها با داده‌های وقوع واقعی، عملکرد بالای مدل‌ها را نشان داد. در نمونه‌برداری میدانی و تحلیل سنجه رسوب، نقش مستقیم زمین‌لغزش‌ها در افزایش بار رسوبی حوضه نیز به تأیید رسید.

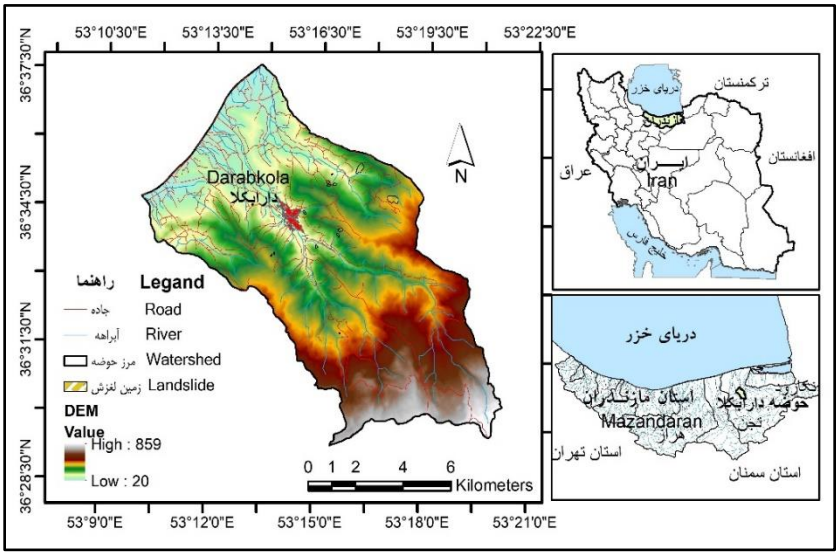
پژوهش‌های خارجی نیز به بررسی ارتباط زمین‌لغزش و تولید رسوب پرداختند و یافته‌های مشابهی را گزارش کرده‌اند. یانگ و همکاران (Yang, Jan, Yen & Wang, 2019) در مطالعه حوضه رودخانه تسنگ ون[1] در تایوان نشان دادند که توزیع زمین‌لغزش‌ها و ویژگی‌های لیتولوژیکی منطقه نقش تعیین‌کننده‌ای در تولید رسوب دارند. آن‌ها دریافتند که بارش‌های شدید با افزایش رواناب و فرسایش شیب‌ها باعث تشدید انتقال رسوب در بازه‌های پایین‌دست می‌شود. این پژوهش اهمیت منابع رسوبی بالادست زمین‌لغزش‌ها را در تغذیه سامانه رودخانه‌ای و تغییر ظرفیت انتقال رسوب برجسته کرده است. کو و همکاران (Kou et al., 2020) در تحقیقی با تعیین مساحت و حجم ۵۴۲۰ رانش خاک کم‌عمق در بزرگ‌ترین دشت فلات لس چین، آن‌ها را با فرسایش پانزده حوضه آبخیز مقایسه کردند. نتایج مربوط به تغییرات مکانی فرسایش خاک نشان داد که به‌طور کلی فرسایش در شمال شدیدتر است و با توزیع زمین‌لغزش‌ها مطابقت دارد. این تجزیه و تحلیل نتیجه‌ای رضایت‌بخش از برازش خطی ($R^2 = 0.68$) بین مساحت زمین‌لغزش و فرسایش خاک را نشان داده است. کامپفورتس و همکاران (Campforts et al., 2020) در بررسی حوضه رود یارلنگ تسنگپو در هیمالیای شرقی به این نتیجه رسیدند که زمین‌لغزش‌ها حجم زیادی از رسوبات را تولید و به رودخانه‌ها منتقل می‌کنند. آنها نشان دادند که می‌توان از مدل HyLands برای ارزیابی تأثیر فعالیت زمین‌لغزش‌ها بر ویژگی‌های جریانی و دامنه‌ها استفاده کرد. راموس شارون و همکاران (Ramos-Scharrón, Arima, Guidry, Ruffe & Vest, 2021) با بررسی زمین‌لغزش‌ها در پورتوریکو نشان دادند که زمین‌لغزش‌های کم‌عمق ناشی از بارندگی‌های شدید می‌توانند در مدت‌زمانی کوتاه، حجمی معادل چند سال رسوب تولید کنند. آن‌ها با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و تحلیل‌های فتوگرامتری تخمین زدند که بیش از ۲۳۰ هزار تن رسوب تنها در یک حوضه ۴۳ کیلومتر مربعی جابجا شده است. ژیه و همکاران (Xie, Coulthard & McLelland, 2022) با استفاده از مدل‌سازی عددی در حوضه رودخانه هونگهی[2] نشان دادند که موقعیت مکانی زمین‌لغزش‌ها تأثیر قابل توجهی بر الگوی انتقال رسوب و میزان رسوب خروجی از حوضه دارد. زمین‌لغزش‌های واقع در پایین‌دست به‌دلیل اتصال بیشتر به شبکه زهکشی، رسوب بیشتری تولید می‌کنند، در حالی که لغزش‌های بالادست باعث انباشت رسوب در شیب‌ها می‌شوند. بلاینه و همکاران (Belayneh et al., 2022) در حوضه دریاچه‌های آبایا-چامو[3] در اتیوپی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی، ۴۳۰ زمین‌لغزش و ۷۳۳۶ آبکند فعال را شناسایی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اگرچه بسیاری از زمین‌لغزش‌های بزرگ قدیمی و غیرفعال هستند، اما به‌طور غیرمستقیم با افزایش فرسایش آبکندی در محل لغزش‌ها، نقش مهمی در تولید رسوب ایفا می‌کنند. یان و همکاران (Yan et al., 2022) نیز به بررسی تأثیر ارتباط جانبی زمین‌لغزش‌ها بر تولید رسوب در فلات لسی پرداختند و برای این منظور شاخص جدیدی را معرفی کردند. نتایج نشان داد که لغزش‌های ناشی از بارش شدید تأثیر بلندمدت بر افزایش رسوب‌دهی در زنجیره شیب-آبراهه دارند و شاخص LCI ابزار مناسبی برای سنجش این ارتباط است. تاوولاریس (Tavoularis, 2023) با بررسی ارتباط بین فرسایش خاک و تخریب زمین در منطقه آتیکای یونان به این نتیجه رسید که یک همبستگی بسیار قوی بین فرسایش خاک و مناطق حساس به زمین‌لغزش وجود دارد. همچنین مدل حساسیت زمین‌لغزش می‌تواند به عنوان یک راهنما و مقدمه برای بررسی مسائل فرسایش خاک استفاده شود. با توجه به موارد فوق می‌توان روشی جایگزین برای شناسایی فرسایش خاک ارائه داد؛ به طوری‌که، نتایج تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش در اعتبارسنجی مناطق فرسایشی می‌تواند به برآورد خطرات و آسیب‌پذیری فرسایش خاک کمک کند.

1- TsengWen
2- Hongxi
3- Abaya–Chamo

در بیشتر مطالعاتی که تاکنون به ارزیابی تأثیر زمین‌لغزش‌ها بر رسوب‌دهی حوضه‌ها پرداختند، از آمار ایستگاه‌های هیدرومتری استفاده کرده و با تعیین رابطه داده‌های متناظر دبی جریان و دبی رسوب، حجم رسوب در ایستگاه‌های رسوب‌سنجی مرتبط با حوضه‌ها را برآورد کردند؛ این در حالی است که تمامی مواد جابه‌جا شدهٔ زمین‌لغزش‌ها، امکان انتقال به داخل شبکهٔ زهکشی حوضه‌ها را ندارد؛ بلکه بخشی از آنها در سطح دامنه‌ها باقی می‌مانـند. از طرفی، در بیشتر حوضه‌ها، اطلاعات رسوب اندازه‌گیری شده وجود ندارد و یا اینکه توزیع مکانی ایستگاه‌ها در خروجی حوضه‌های مورد نظر نیست و لغزش‌ها نیز در سراسر زیرحوضه‌ها و در بالادست و پایین‌دست ایستگاه‌ها نیز به وقوع می‌پیوندد. همچنین پایش فرسایش و رسوب، زمین‌لغزش‌ها و میزان جابه‌جایی مواد ناشی از آنها می‌تواند یک فعالیت پرهزینه، سخت و زمان‌بر باشد. منطقه مورد مطالعه یعنی حوضه دارابکلا در استان مازندران یکی از حوضه‌هایی است که حساسیت زیادی به زمین‌لغزش‌ها دارد؛ زیرا از سازندهای سست و تکتونیزه تشکیل شده است و تحت تأثیر تغییرات شدید کاربری اراضی نیز قرار دارد. در این منطقه به دلیل وجود سنگ بستر مارن و زهکشی نادرست جاده، لغزش‌های کم عمق متعددی با فواصل کمتر از ۲۰۰ متری حاشیه جاده ثبت شده است که به دلیل رها شدن جنگل و عدم اعمال مدیریت در حال توسعه و پیشرفت است (Nasiri et al., 2022). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و ارتباط آن با تولید رسوب برای مدیریت بهتر حوضه نیز ضروری است. با توجه به موارد یادشده، هدف از این پژوهش، در ابتدا تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش حوضه دارابکلا و سپس انطباق آن با درجه رسوب‌دهی این حوضه بوده، و در نهایت تأثیر زمین‌لغزش‌ها در میزان رسوب‌دهی حوضه به کمک آزمون آماری مورد ارزیابی قرار گرفته است.

منطقه مورد مطالعه

حوضه دارابکلا با مساحت حدود ۱۰۸۶۸ هکتار در شرق استان مازندران و بین شهرهای ساری و نکا در جنوب جاده ترانزیتی ساری- گرگان قرار دارد و از نظر موقعیت جغرافیایی بین ′۱۱ °۵۳ تا ″۳۲ ′۲۰ °۵۳ طول شرقی و ″۰۸ ′۲۹ °۳۶ تا ″۲۸ ′۳۷ °۳۶ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). از نظر ریخت‌شناسی این منطقه اساساً دارای توپوگرافی نسبتاً ملایمی است و چین‌های منطقه کم ارتفاع و کم شیب بوده و تحت تأثیر کوهزایی آلپی در ترشیاری و طی فاز کوهزایی پاسادنین در اواخر پلیوسن- اوایل کواترنر بوجود آمده‌اند (ورقه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ساری).



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig.1. Geographical Location Map of the Study Area

مواد و روش‌ها

در این پژوهش نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های حوضه دارابکلا با کمک تصاویر گوگل ارث، عملیات میدانی و ثبت موقعیت آن‌ها با کمک GPS تهیه شد. سپس برای تهیه لایه سازندهای زمین‌شناسی، از ورقه زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ ساری، برای تهیه لایه‌های ارتفاع، شیب و جهت دامنه از مدل رقومی ارتفاع DEM سنجنده ASTER با قدرت تفکیک ۳۰ متر از سایت USGS، برای تهیه نقشه کاربری اراضی از تصاویر ماهواره ای لندست ETM و جهت تهیه لایه‌های فاصله از جاده و آبراهه از تابع Distance استفاده گردید. همچنین برای استخراج داده‌های موردنیاز و تهیه ورودی‌های مدل‌های فرسایش و رسوب از گوگل ارث انجین استفاده شد. برای عامل فرسایندگی باران از ماهواره TerraClimate، برای عامل طول و درجه شیب از ماهواره MERIT Hydro، برای عامل مدیریت پوشش گیاهی از سنجنده‌های TM[1]، ETM+[2] و OLI [3] ماهواره لندست و برای عامل فرسایش‌پذیری خاک از گزارش منابع طبیعی استان مازندران استفاده شد.

در راستای اهداف پژوهش حاضر، ابتدا برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش حوضه مورد مطالعه با توجه به شرایط منطقه، متغیرها و عوامل اصلی موثر بر زمین‌لغزش شامل جنس سنگ، ارتفاع از سطح دریا، شیب، جهت دامنه، کاربری اراضی، فاصله از جاده و فاصله از آبراهه مدنظر قرار گرفتند و برای تعیین وزن طبقات عوامل مؤثر از مدل تراکم سطح استفاده شده است. این مدل که امکان بررسی نقش عوامل محیطی مختلف در وقوع زمین‌لغزش‌ها را فراهم می‌کند؛ ابتدا توسط ون وستن و همکاران (Van Westen, Rengers, Terline & Soaters, 1997) بر اساس ارزیابی میزان تأثیر متغیرهای مستقل بنا نهاده شده است. در این پژوهش لایه‌های متغیرهای مستقل با لایه پراکنش زمین‌لغزش‌ها در محیط ArcGIS همپوشانی شد و تراکم آن در هر طبقه از عوامل محاسبه گردید. مقادیر وزنی طبقات نیز با استفاده از رابطه (۱) به دست آمد:

$$Warea= (A/B*100)- (C/D*100) \quad (۱)$$

در رابطه بالا، Warea وزن تراکم سطح، A تعداد پیکسل‌های زمین‌لغزش در هر طبقه، B تعداد پیکسل‌های هر طبقه، C کل پیکسل‌های زمین‌لغزش‌ها در منطقه و D کل پیکسل‌های منطقه می‌باشد. برای ارزیابی صحت نقشه نهایی پهنه‌بندی، به طور تصادفی از یک سوم از زمین‌لغزش‌های منطقه استفاده شده است؛ به این صورت که یک سوم از نقاط زمین‌لغزش که در فرایند تهیه نقشه و مدل‌سازی دخالت نداشتند را با نقشه پهنه‌بندی همپوشانی کرده و سطح لغزش در کلاس‌های مختلف حساسیت به دست آمد. سپس میزان دقت نقشه با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$P = ks / s \quad (۲)$$

که در آن p احتمال تجربی، ks تعداد پیکسل‌های زمین‌لغزش در طبقه متوسط به بالا و s تعداد کل پیکسل‌های زمین‌لغزش منطقه است. در ارزیابی مدل‌ها، هر چه P به عدد یک نزدیک‌تر باشد، آن مدل صحت بیشتری دارد. همچنین در این پژوهش از شاخص AUC[4] که مبتنی بر منحنی ROC[5] است، نیز استفاده گردید. در این روش، با استفاده از مقادیر احتمال وقوع لغزش که از نقشه حساسیت به‌دست آمد و مقایسه آن با مکان واقعی زمین‌لغزش‌ها (نقاط ارزیابی)، منحنی ROC در نرم افزار SPSS ترسیم شده و سطح زیر منحنی AUC محاسبه شد. مقدار AUC بین ۰/۵ (عدم توانایی مدل) تا ۱ (دقت کامل) متغیر است.

در مرحله بعد، برای تعیین درجه رسوب‌دهی زمین‌لغزش‌ها، ابتدا نقشه طبقات فرسایش در حوضه با استفاده از مدل‌های MPSIAC[6] و RUSLE تهیه شد. مدل PSIAC ابتدا توسط کمیته مدیریت آب امریکا برای محاسبه شدت فرسایش خاک و تولید رسوب بر اساس ۹ عامل زمین شناسی، خاک، آب وهوا، پوشش گیاهی، رواناب سطحی، پستی و بلندی، استفاده از زمین، وضعیت فرسایش سطحی و فرسایش رودخانه‌ای ارائه شد. سپس در سال ۱۹۸۲ در روش تعیین عامل‌های مذکور تغییراتی داده شد. در مدل

1- Thematic Mapper
2- Enhance Thematic Mapper
3- Operational Land Imager
4 - Area Under the Curve
5- Receiver Operating Characteristic
6- Modified PSIAC

MPSIAC برای هر یک از عوامل موثر، ضرایبی در نظر گرفته شد و معادلاتی جهت برآورد آنها پیشنهاد شده که برآورد کمّی هر یک از عامل‌ها آسانتر و دقت مدل نیز افزایش یافته است. این مدل در حال حاضر مناسب‌ترین مدل مطالعه برای حوضه‌های آبخیز کشور شناخته شده است (Motamed Vaziri, Valeh & Ahmadi, 2023). در مدل RUSLE برای تعیین میزان فرسایش خاک حوضه، لایه‌های تولید شده شامل لایه‌های فرسایندگی باران، فرسایش‌پذیری خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی به کمک افزونه Spatial Analyst برنامه ArcGIS در همدیگر ضرب شده و میزان هدررفت سالانه خاک (A) بر حسب تن در هکتار در سال بر اساس سلول به سلول به دست آمد.

برای ارزیابی میزان دقت مدل‌های مذکور از مدل BLM[1] که تمامی عوامل آن از طریق مشاهدات میدانی به دست می‌آید، به عنوان نقشه واقعیت زمینی استفاده شده است. این مدل‌ها، عوامل بیشتری را در ارزیابی فرسایش و رسوب از حوضه‌ها در نظر می‌گیرند و بیشترین کاربرد را در مطالعات و تحقیقات آبخیزداری دارند (Bayat, Arabkhedri, Behnam & Gerami, 2020). نقشه وضعیت فرسایش در شرایط فعلی بر اساس مدل BLM و جمع امتیاز فرسایش سطحی، لاشبرگ سطحی، پوشش سنگی سطح زمین، آثار تخریب در سطح زمین، فرسایش شیاری سطحی و آبکندی به دست آمد. یک لایه نقطه‌ای با شبکه‌بندی منظم به منظور نمونه‌برداری در ۱۲۰۴ نقطه از نقشه‌های حاصل از این مدل‌ها تهیه شد و بر اساس این نقاط نمونه‌برداری، میزان شاخص‌های آماری RMSE[2] (جذر میانگین مربعات خطا)، MAE[3] (میانگین خطای مطلق)، MSE[4] (میانگین مربعات خطا) و NSEC[5] (ضریب کارایی ناش و ساتکلیف) به دست آمد. آنگاه، با توجه به صحت بالای مدل‌های مورد استفاده، نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با نقشه درجه رسوب‌دهی حاصل از مدل MPSIAC در محیط ArcGIS همپوشانی شد. بر این اساس، برای هر یک از کلاس‌های حساسیت زمین‌لغزش، میانگین درجه رسوب‌دهی استخراج گردید. به‌منظور بررسی معنی‌داری آماری تفاوت بین این کلاس‌ها از نظر تولید رسوب، از آزمون آماری آنالیز واریانس یک طرفه ANOVA استفاده شده است. این آزمون وقتی انجام می‌شود که نمونه انتخاب شده از یک جمعیت توزیع نرمال داشته و در مسأله مطرح شده، چگونگی اختلاف چند گروه مستقل مقایسه شوند. آماره آزمون در این وضعیت به صورت رابطه (۳) است (Nobakht, 2016):

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{K} n_i (\bar{X}_i - \bar{X}_{..})^2 / K-1}{\sum_{i=1}^{K} \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_{i.})^2 / \sum_{i=1}^{K} n_i - K} \qquad (۳)$$

در این رابطه، k تعداد کل گروه‌ها یا جامعه‌های آماری مورد مقایسه و n تعداد مشاهدات است. همچنین، $\bar{X}_{i.}$ میانگین مشاهدات جامعه i ام و $\bar{X}_{..}$ میانگین همه nk مشاهده صورت گرفته است. عبارت صورت کسر، نمایانگر واریانس بین‌گروهی (Between-group variance) است، که پراکندگی میانگین گروه‌ها نسبت به میانگین کلی را نشان می‌دهد. عبارت مخرج کسر، بیانگر واریانس درون‌گروهی[6] است که پراکندگی مشاهدات درون هر گروه نسبت به میانگین همان گروه را نشان می‌دهد. از نسبت این دو واریانس، آماره F به‌دست می‌آید که در آزمون تحلیل واریانس برای بررسی معنی‌داری تفاوت میان میانگین گروه‌ها استفاده می‌شود. خلاصه محاسبه آماری آنالیز واریانس به صورت جدول ۱ ارائه شده است (Bihamta & Zare Chahoki, 2015). منابع تغییر شامل تیمار (متغیر گروه‌بندی) و خطای آزمایشی است. در ابتدا مجموع مربعات منابع تغییر مشخص می‌شود و سپس از تقسیم مجموع مربعات تیمار و خطا به درجه آزادی آنها، میانگین مربعات (واریانس) برای هر کدام به دست می‌آید. جهت محاسبه آماره F میانگین مربعات تیمار به میانگین مربعات خطا تقسیم می‌شود.

1- Bureau of Land Management
2- Root Mean Square Error
3- Mean Absolute Error
4- Mean Square Error
5- Nash-Sutcliffe Model Efficiency Coefficient
1-Within Group Variance

جدول۱- آنالیز واریانس

Table 1- Analysis of Variance (Bihamta & Zare Chahouki, 2015)

آماره آزمون F	میانگین مربعات Mean Square	درجه آزادی df	مجموع مربعات Sum of Squares	
$\frac{MSB}{MSE}$	MSB	k-1	$n\sum_i(\bar{X}_{i.} - \bar{X}_{..})^2$	بین گروه‌ها Between Groups
	MSE	n-k	$\sum_i\sum_j(X_{ij} - \bar{X}_{i.})^2$	داخل گروه‌ها Within Groups
		n-1	$\sum_i\sum_j(X_{ij} - \bar{X}_{..})^2$	کل Total

نتایج و بحث

ارزیابی پراکنش زمین‌لغزش در حوضه دارابکلا

در این پژوهش ابتدا موقعیت زمین‌لغزش‌های موجود در حوضه ثبت شد که مجموع آنها شامل ۲۴۴ پیکسل می‌باشد. سپس وضعیت پراکنش این پیکسل‌ها در هر کدام از لایه‌های جنس سنگ، شیب، جهت دامنه، ارتفاع، فاصله از رودخانه و فاصله از جاده مورد بررسی قرار گرفت و تراکم سطح طبقات نیز محاسبه شد. نتایج در جدول ۲ و شکل ۲ ارائه شده است. تقاطع لایه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه با لایه جنس سنگ نشان می‌دهد که کنگلومرا، مارن، ماسه سنگ و سیلتستون (Pl_{cm}) با تراکم سطح زمین‌لغزش ۰/۶۳۴، بیش‌ترین حساسیت را دارد. پس از آن مارن و ماسه سنگ با افق کنگلومرای دانه‌ریز (Pl_{ack}) با تراکم سطح ۰/۴۴۷ حساسیت بیشتری را نشان می‌دهد. نتایج تقاطع لایه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه با سایر لایه‌ها نیز در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، طبقه شیب ۲۵-۱۵درصد با تراکم سطح ۰/۱۲۷، بیش‌ترین میزان حساسیت زمین‌لغزش را نشان می‌دهد و بعد از آن، طبقه ۱۵-۵ درصد با رقم ۰/۰۳۴-، در مرتبه بعدی قرار دارد. همچنین نتایج در ارتباط با جهت دامنه نشان می‌دهد که جهت‌های جنوب غرب و غرب به ترتیب با تراکم سطح ۰/۱۱۷ و ۰/۰۱۹ دارای زمین‌لغزش بیشتری هستند. طبقه ارتفاعی ۳۰۰-۱۵۰متر با تراکم سطح ۰/۲۲۸ بیش‌ترین حساسیت را نشان داده است؛ در مقابل، در طبقات بالای ۴۵۰ متر، هیچ زمین‌لغزشی ثبت نشده است. نتایج بررسی فاصله از آبراهه نشان می‌دهد که طبقه فاصله ۳۰۰-۱۵۰ متر از آبراهه با تراکم سطح ۰/۱۶۵ بیش‌ترین حساسیت را دارند؛ اما در فاصله بالای ۶۰۰ متر از آبراهه‌ها هیچ زمین‌لغزشی ثبت نشده است. بررسی زمین‌لغزش های منطقه در ارتباط با فاصله از جاده نشان می‌دهد که طبقات ۳۰۰-۱۵۰ متر و ۱۵۰-۰ متر از جاده به ترتیب با تراکم سطح ۰/۲۷۳ و ۰/۰۰۱، دارای بیش‌ترین میزان حساسیت هستند. نتایج تقاطع لایه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه با لایه کاربری اراضی نیز نشان می‌دهد کاربری کشاورزی دیم با تراکم سطح ۰/۳۰۴، بیش‌ترین حساسیت زمین‌لغزش منطقه را دارند.

جدول ۲- تراکم سطح طبقات هر یک از عوامل موثر در زمین‌لغزش‌های حوضه دارابکلا

Table 2- Area Density of Classes for Each Factor Influencing Landslides in the Darabkola Watershed

عوامل موثر Effective Factors	طبقه Class	تعداد پیکسل هر طبقه Number of Pixels in Each Class	تعداد پیکسل زمین‌لغزش Number of Landslide Pixels	تراکم سطح Area Density
جنس سنگ Lithology	M_3^{sc}	4520	8	-0.004
	Pl_{cm}	5520	45	0.634
	M_2^{sm}	50204	89	-0.004
	M_1^{m}	13620	0	-0.181

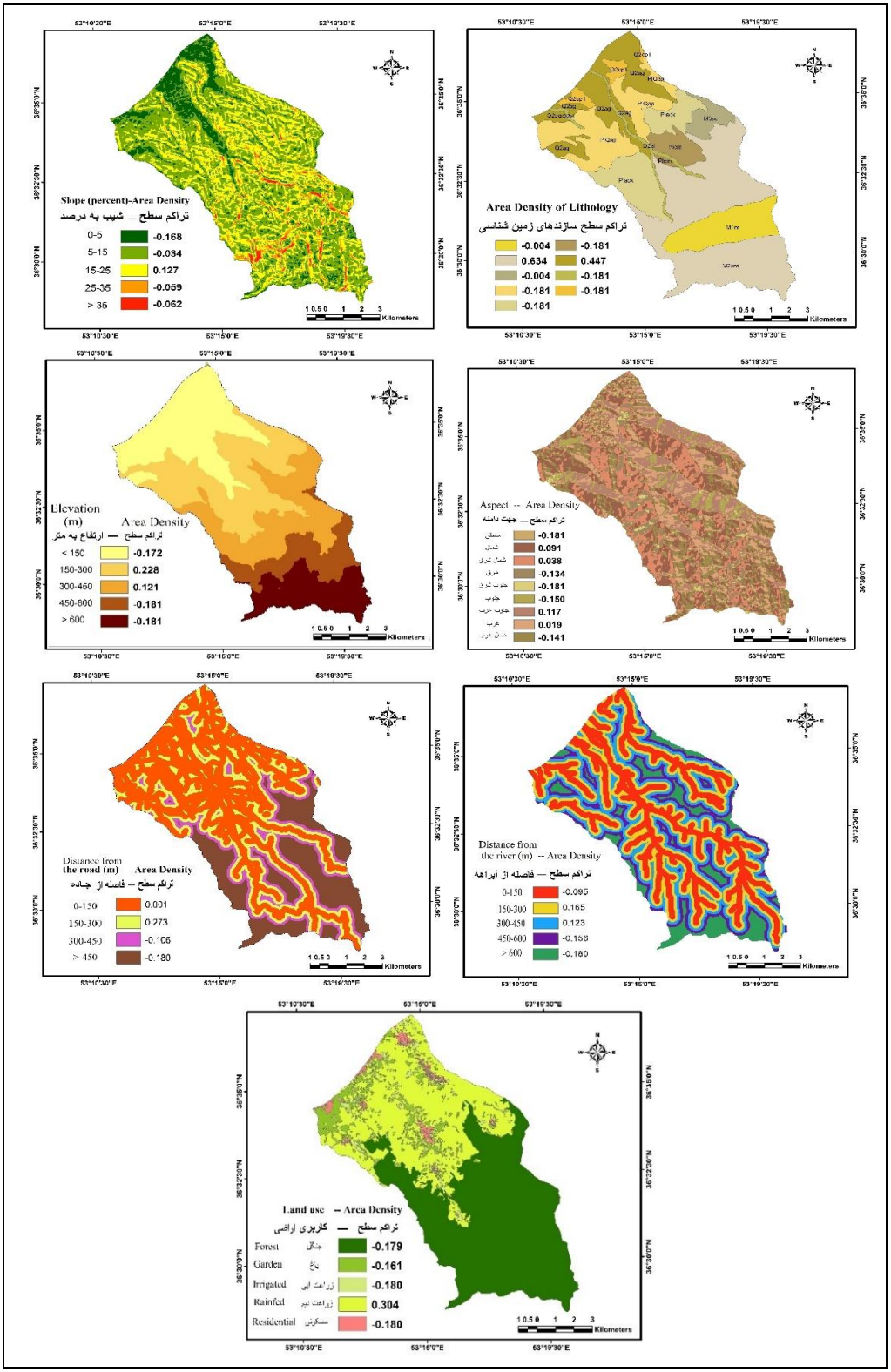
	Q_2^{ag}, Q_2^{cp1}	22116	0	-0.181
	Pl_{ack}	16253	102	0.447
	Q_2^{al}, Pl_{Qap}	22982	0	-0.181
شیب (درصد) Slope (percent)	0-5	16062	2	-0.168
	5-15	66673	98	-0.034
	15-25	43148	133	0.127
	25-35	7394	9	-0.059
	> 35	1687	2	-0.062
	Flate	396	0	-0.181
جهت دامنه Aspect	N	30134	82	0.091
	NE	23294	51	0.038
	E	8512	4	-0.134
	SE	2504	0	-0.181
	S	6593	2	-0.150
	SW	18152	54	0.117
	W	20538	41	0.019
	NW	24843	10	-0.141
ارتفاع (متر) Elevation (m)	< 150	34268	3	-0.172
	150-300	37202	152	0.228
	300-450	29490	89	0.121
	> 600	34004	0	-0.181
فاصله از رودخانه (متر) Distance from the river (m)	0-150	44526	38	-0.095
	150-300	34696	120	0.165
	300-450	27019	82	0.123
	450-600	16283	4	-0.156
	> 600	12691	0	-0.181
فاصله از جاده (متر) Distance from the road (m)	0-150	66781	121	0.001
	150-300	24897	113	0.273
	300-450	13350	10	-0.106
	> 450	30187	0	-0.181
کاربری اراضی Land use	جنگل Forest	70994	1	-0.179
	باغ Garden	10343	2	-0.161

کشاورزی آبی Irrigated Agriculture	1485	0	-0.181
زراعت دیم Rainfed Agriculture	49734	241	0.304
مسکونی Residential	2659	0	-0.181

تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش حوضه داربکلا و ارزیابی دقت آن

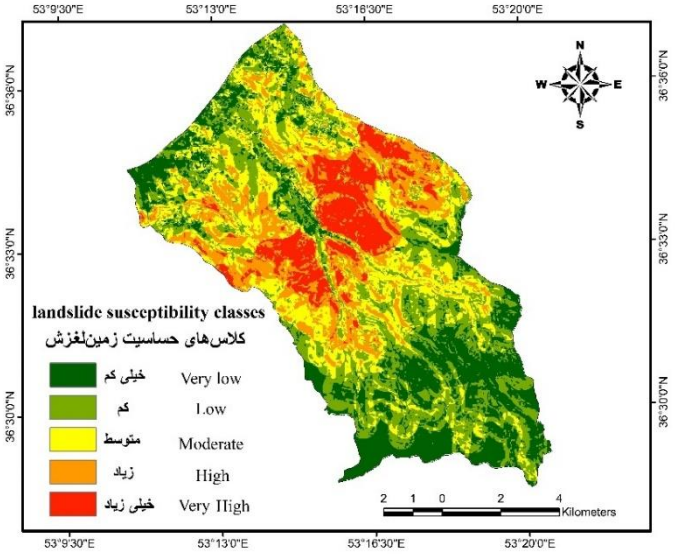
پس از محاسبه وزن هر طبقه از عوامل تأثیرگذار بر رخداد زمین‌لغزش‌ها در حوضه مورد مطالعه (جدول ۱)، نقشه‌های وزنی جنس سنگ، شیب، جهت دامنه، ارتفاع، فاصله از رودخانه و فاصله از جاده ترکیب شده و نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل تراکم سطح تهیه شد. در مرحله بعد به منظور ارزیابی نتایج و مقایسه با شدت فرسایش و درجه رسوب‌دهی، نقشه مذکور با استفاده از روش شکست طبیعی[1] به پنج کلاس حساسیت زمین‌لغزش طبقه بندی شده است (شکل ۳). نتایج نشان می‌دهد که ۲۱/۷ درصد از مساحت حوضه در کلاس حساسیت خیلی کم، ۲۸/۵ درصد حساسیت کم، ۲۳/۱ درصد حساسیت متوسط، ۱۶/۸ درصد حساسیت زیاد و ۹/۸ درصد از مساحت حوضه در کلاس حساسیت خیلی زیاد قرار دارد. از آنجا که در این پژوهش برای وزن‌دهی به لایه‌ها و تهیه نقشه حساسیت از داده‌های مکانی زمین‌لغزش استفاده شد، جهت ارزیابی دقت مدل تولید شده، در گام نخست از روش احتمال تجربی (p) به‌عنوان یکی از روش‌های معتبر کلاسیک استفاده شد. برای این منظور، یک‌سوم از زمین‌لغزش‌های منطقه که در تهیه نقشه حساسیت دخیل نبودند، به صورت تصادفی و با استفاده از ابزار Random Selection در محیط ArcGIS انتخاب شده و با نقشه حساسیت همپوشانی گردید. این انتخاب در چارچوب رویکرد اعتبارسنجی متقابل انجام گرفت تا از داده‌های مستقل برای ارزیابی مدل استفاده شود. مقدار P به‌دست‌آمده برابر با ۰/۹۹ بود که بیانگر دقت بالای مدل است. در این پژوهش علاوه بر روش احتمال تجربی (p)، از شاخص AUC نیز استفاده شده است. این شاخص مبتنی بر منحنی ROC بوده و دقت کلی مدل را در تفکیک صحیح نقاط دارای لغزش از نقاط فاقد لغزش نشان می‌دهد. در این مطالعه، منحنی ROC در محیط SPSS ترسیم شد (شکل ۴). مقدار به‌دست‌آمده برای AUC برابر با ۰/۹۲ بود که نشان‌دهنده دقت بسیار خوب مدل پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش حوضه دارابکلا است.

1- Natural break



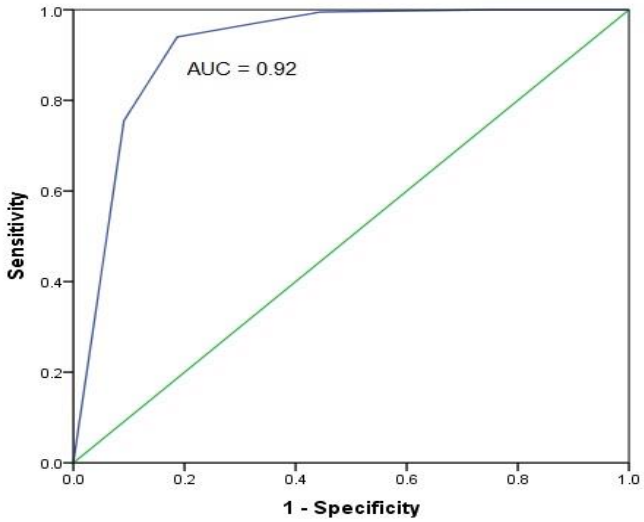
شکل ۲- نقشه‌های تراکم سطح هر یک از عوامل موثر حوضه دارابکلا

Fig.2. Area Density Maps for Each Influencing Factor in the Darabkola Watershed



شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش حوضه دارابکلا

Fig.3. Landslide Susceptibility Zoning Map of the Darabkola Watershed



شکل ۴- منحنی ROC برای نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش حوضه دارابکلا

Fig.4. ROC Curve for the Landslide Susceptibility Zonation Map of the Darabkola Watershed

ارزیابی نقشه‌های طبقات فرسایش و درجه رسوب‌دهی حوضه دارابکلا

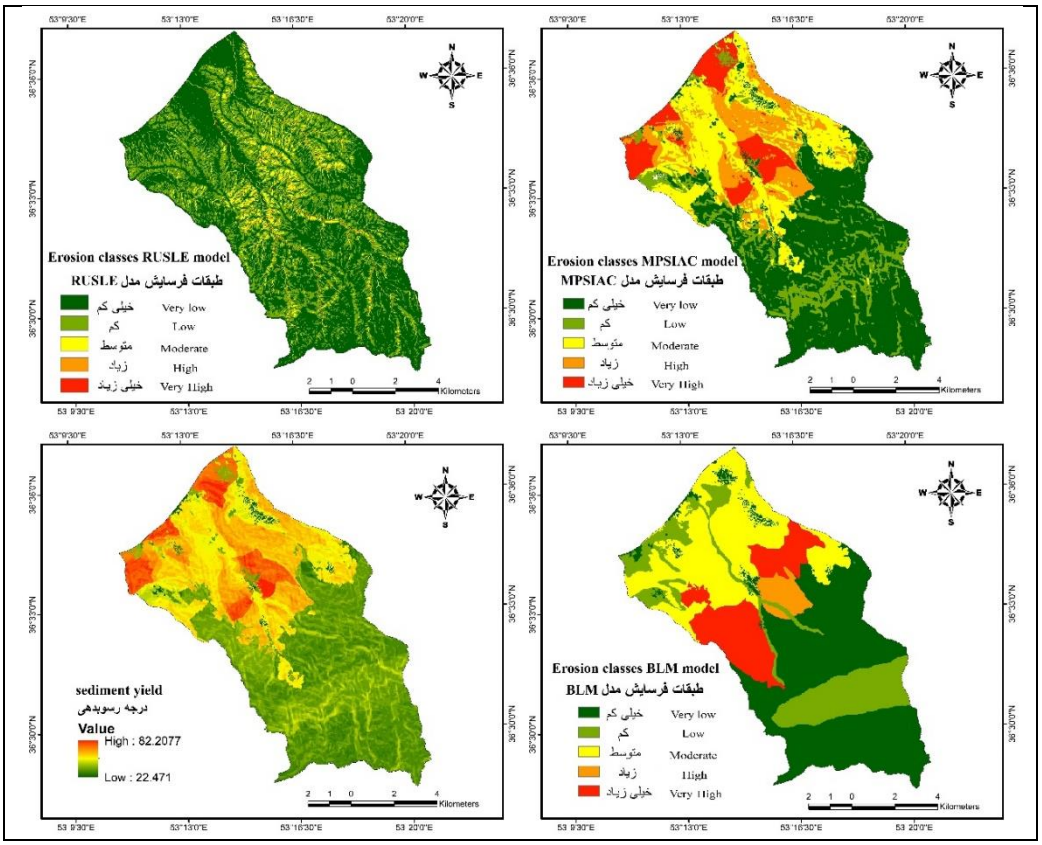
برای تعیین درجه رسوب‌دهی کلاس‌های زمین‌لغزش‌ها در حوضه دارابکلا، ابتدا نقشه پراکنش طبقات فرسایش منطقه با استفاده از مدل‌های MPSIAC و RUSLE تهیه شد و سپس با خروجی مدل BLM مقایسه گردید. مقادیر عوامل این مدل‌ها در جدول ۳ آمده است. از عوامل نه‌گانه مؤثر بر تولید رسوب در مدل MPSIAC، عوامل فرسایش سطحی و استفاده از زمین به ترتیب با ۹/۷۱ و ۶/۷۰ بالاترین مقدار را به خود اختصاص دادند. نتایج عوامل مدل RUSLE نیز نشان می‌دهد که فرسایندگی باران، عامل اصلی مؤثر

در فرسایش خاک است که با رقم ۱۲۰/۴۵ بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داده است. نقشه‌های حاصل از اجرای مدل‌های مذکور در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که طبقات فرسایش خیلی کم و خیلی زیاد در مدل MPSIAC به ترتیب ۴۲/۸ و ۸/۶ درصد از مساحت کل حوضه را به خود اختصاص داده‌اند، اما مساحت این طبقات در مدل RUSLE به ترتیب ۵۸/۹ و ۰/۱۴ درصد از مساحت حوضه است که بیانگر تفاوت و تأثیر کاربرد لایه‌های متفاوت بین این مدل‌هاست. جهت ارزیابی درستی نقشه‌های طبقات فرسایش دو مدل مذکور، از مدل BLM که تمامی عوامل آن از طریق مشاهدات میدانی به دست می‌آیند؛ استفاده شده است. نتایج شاخص های آماری بر اساس نقشه نقاط نمونه‌برداری (۱۲۰۴ نقطه) نشان می‌دهد که مقادیر آماره‌های RMSE، MAE و MSE در مدل MPSIAC به ترتیب ۱/۲۳۵، ۰/۶۵۸ و ۱/۵۲۶ و در مدل RUSLE به ترتیب ۱/۵۱۴، ۱ و ۲/۲۹۳ به دست آمد که نشان می‌دهد آماره‌ها در مدل MPSIAC دارای مقادیر پایین‌تری بوده و در نتیجه این مدل، خطای کمتری دارد. همچنین مقدار آماره NSEC در مدل MPSIAC برابر ۰/۰۹۱ و در مدل RUSLE برابر ۰/۳۶۶- و منفی شده که بیانگر دقت کمتر این مدل است. بنابراین، با توجه با دقت بیشتر مدل MPSIAC، طبق روابط مربوط به این مدل، به لایه‌های عوامل مؤثر امتیاز داده شد. پس از ارزیابی عوامل مؤثر در فرسایش و تولید رسوب در منطقه، از جمع امتیاز آن‌ها درجه رسوب‌دهی حاصل شد (شکل ۵). همانطور که مشاهده می‌شود، بیش‌ترین و کم‌ترین درجه رسوب‌دهی در منطقه به ترتیب ۸۲/۲۱ و ۲۲/۴۷ می‌باشد که به معنی شدت فرسایش خیلی زیاد تا خیلی کم است.

جدول ۳- مقادیر میانگین عوامل مدل MPSIAC و RUSLE در سطح حوضه دارابکلا

Table 3- Mean Values of MPSIAC and RUSLE Model Factors at the Darabkola Watershed

مقدار Value	عوامل مدل Model factors	مدل Model	مقدار Value	عوامل مدل Model factors	مدل Model
120/45	فرسایندگی باران Rainfall Erosion	RUSLE	5/10	زمین‌شناسی سطحی Surface Geology	MPSIAC
0/29	فرسایش‌پذیری خاک Soil Erodibility		4/39	خاک Soil	
2/70	توپوگرافی طول شیب Topography(L)		5/63	آب‌وهوا Climate	
2/01	توپوگرافی درجه شیب Topography(S)		5/01	رواناب Runoff	
0/22	مدیریت پوشش گیاهی Vegetation		4/48	توپوگرافی Topography	
1/00	عملیات حفاظتی برای خاک Conservation		4/17	پوشش زمین Ground Cover	
30/62	میانگین فرسایش سالانه Average of annual loss (به تن در هکتار در سال) (Tons per hectare per year)		6/70	استفاده از زمین Land Use	
			9/71	فرسایش سطحی Surface Erosion	
			5/72	فرسایش رودخانه‌ای Channel Erosion	



شکل ۵- نقشه طبقات فرسایش با مدل MPSIAC (بالا راست)، مدل RUSLE (بالا چپ)، مدل BLM (پایین راست) و درجه رسوب‌دهی حوضه دارابکلا (پایین چپ)

Fig.5. Erosion Classes Maps Using the MPSIAC Model (Top Right), RUSLE Model (Top Left), BLM Model (Bottom Right), and Sediment Yield Rate of the Darabkola Watershed (Bottom Left)

بررسی ارتباط بین زمین‌لغزش‌ها با شدت فرسایش و رسوب‌دهی حوضه دارابکلا

به‌منظور بررسی ارتباط کمی بین زمین‌لغزش و رسوب‌دهی، نقشه حساسیت زمین‌لغزش که به پنج کلاس حساسیت خیلی کم تا خیلی زیاد طبقه‌بندی شده بود (شکل ۴) و نقشه عددی شدت فرسایش و درجه رسوب‌دهی حاصل از مدل MPSIAC (شکل ۵) در محیط Arc GIS به‌صورت Raster همپوشانی شدند. از ابزار Zonal Statistics as Table در بخش Spatial Analyst برای محاسبه میانگین مقادیر رسوب‌دهی در هر کلاس حساسیت زمین‌لغزش استفاده شد. این فرآیند منجر به تولید یک جدول عددی شد، که در آن میانگین و انحراف معیار درجه رسوب‌دهی در هر کلاس به تفکیک مشخص گردید (جدول ۴). این تحلیل زمینه را برای بررسی معنی‌داری آماری تفاوت‌ها از طریق آزمون ANOVA فراهم ساخت. بیشترین درجه رسوب‌دهی در منطقه مربوط به کلاس حساسیت زمین‌لغزش خیلی زیاد است که به رقم ۶۱/۳۵ می‌رسد و کم‌ترین مقدار آن مربوط به کلاس خیلی کم است که به رقم ۴۳/۴۲ کاهش می یابد. به این ترتیب محدوده‌های با کلاس خیلی زیاد زمین‌لغزش در میزان فرسایش و تولید رسوب حوضه مورد مطالعه نقش بیشتری دارند (شکل ۶).

جدول ۴- میانگین درجه رسوب‌دهی هر یک از کلاس‌های حساسیت زمین‌لغزش در منطقه

Table 4- Average Sediment Yield Rate for Each Landslide Susceptibility Class in the Region

کلاس‌های زمین‌لغزش Landslide Classes	تعداد داده Number of Data	میانگین درجه رسوب‌دهی Mean Sediment Yield Rate	انحراف معیار Standard Deviation
خیلی کم Very low	2346	43.42	9.43
کم Low	3067	46.19	10.32
متوسط Moderate	2528	49.73	11.18
زیاد High	1837	53.43	9.81
خیلی زیاد Very high	1050	61.35	7.85



شکل ۶- وقوع زمین‌لغزش‌ها در منطقه و بار رسوبی زیاد ناشی از آن‌ها

Fig.6. Landslide Occurrences in the Region and the Resulting High Sediment Yield

به منظور بررسی معنی‌داری تفاوت درجه رسوب‌دهی در کلاس‌های مختلف حساسیت زمین‌لغزش در منطقه با توجه به حجم نمونه‌ها (که بزرگ هست) از آزمون آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده گردید. نتایج به دست آمده از آزمون مذکور در جدول ۵ آمده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، نتایج در سطح ۰/۰۱ نشان می‌دهد درجه رسوب‌دهی کلاس‌های حساسیت زمین‌لغزش‌ها در منطقه تفاوت معنی‌داری با یکدیگر دارند.

در این راستا کو و همکاران (Kou et al., 2020) در منطقه تحقیق خود نشان داده‌اند که، بین شدت فرسایش خاک و توزیع رویدادهای زمین‌لغزش رابطه معنی‌داری وجود دارد. عسگری و همکاران (Asgari et al., 2019) و تاولاریس (Tavoularis, 2023) نیز با بررسی ارتباط بین فرسایش خاک و تخریب زمین به این نتیجه رسیدند که یک همبستگی بسیار قوی بین فرسایش خاک و مناطق حساس به زمین‌لغزش وجود دارد.

جدول ۵- نتایج آزمون آنالیز واریانس درجه رسوب‌دهی زمین‌لغزش‌ها

Table 5- ANOVA Test Results for Landslide Sediment Yield Rates

	مجموع مربعات Sum of Squares	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square	آماره آزمون F	سطح معنی‌داری Sig.
بین گروه‌ها Between Groups	294610	4	73652	729	.000
داخل گروه‌ها Within Groups	1092312	10823	100		
کل Total	1386922	10827			

به منظور بررسی دقیق‌تر و اینکه درجه رسوب‌دهی در کدام کلاس‌های حساسیت زمین‌لغزش، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر دارند؛ از آزمون توکی استفاده گردید. نتایج بدست آمده در جدول ۶ نشان داده شده است که بر اساس آن درجه رسوب‌دهی در تمامی کلاس‌های حساسیت زمین‌لغزش، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر دارند. همچنین، کلاس‌های زمین‌لغزش زیاد و خیلی‌زیاد با رقم ۵۳/۴۲ و ۶۱/۳۵ بیش‌ترین درجه رسوب‌دهی را به خود اختصاص دادند. بنابراین ضروری است، محدوده‌های با حساسیت زمین‌لغزش زیاد و خیلی زیاد به عنوان مراکز اصلی تولید رسوبات در برنامه‌ریزی‌های حفاظت آب و خاک مورد توجه بیشتری قرار گیرد.

جدول ۶- زیرمجموعه‌های یکسان بر اساس آزمون توکی برای درجه رسوب‌دهی کلاس‌های حساسیت زمین‌لغزش

Table 6- Homogeneous Subsets Based on Tukey Test for Sediment Yield in Landslide Susceptibility Classes

کلاس‌های زمین‌لغزش Landslide Classes	درجه رسوب‌دهی Sediment Yield Rate				
	میانگین زیرمجموعه۱	میانگین زیرمجموعه۲	میانگین زیرمجموعه۳	میانگین زیرمجموعه۴	میانگین زیرمجموعه ۵
خیلی‌کم Very low	43.42				
کم Low		46.19			
متوسط Moderate			49.73		
زیاد High				53.43	
خیلی‌زیاد Very high					61.35

نتیجه‌گیری

زمین‌لغزش‌ها می‌توانند منشأ اصلی رسوبات در بسیاری از حوضه‌ها به شمار رفته و از این رو، در ارزیابی میزان فرسایش و رسوب و همچنین مدیریت حوضه‌ها نقش انکار نشدنی دارند. در این پژوهش، ابتدا زمین‌لغزش‌های حوضه دارابکلا مورد بررسی قرار گرفت و نقشه پهنه‌بندی حساسیت آن با استفاده از مدل تراکم سطح تهیه شد. ارزیابی صحت آن به کمک رابطه احتمال تجربی (P) نشان داد که نقشه حساسیت زمین‌لغزش تهیه شده، صحت بالایی (p= 0.99) دارد. همچنین، شاخص AUC که مبتنی بر ROC بوده، سطح دقت مدل را ۰/۹۲ و بسیار خوب نشان داد. نقشه حساسیت زمین‌لغزش حاکی از آن است که به ترتیب ۱۶/۸ و ۹/۸ درصد از مساحت حوضه در کلاس حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار دارد.

برای تعیین درجه رسوب‌دهی زمین‌لغزش‌ها، دو مدل MPSIAC و RUSLE اجرا شد و برای ارزیابی آنها از داده‌های مشاهده‌ای مدل پایه BLM و شاخص‌های آماری استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل MPSIAC نسبت به RUSLE دقت بالاتری در تعیین طبقات فرسایش خاک حوضه داشت؛ به‌طوری که مقدار آماره RMSE در مدل MPSIAC برابر ۱/۲۳۵ و در RUSLE معادل ۱/۵۱۴ به‌دست آمد. شاخص کارایی NSEC در مدل MPSIAC مثبت و برابر با ۰/۰۹۱ و در مدل RUSLE منفی و برابر با ۰/۳۶۶- بود. بر این اساس، نقشه درجه رسوب‌دهی حاصل از این مدل با نقشه حساسیت زمین‌لغزش حوضه همپوشانی شد و درجه رسوب‌دهی کلاس‌های حساسیت زمین‌لغزش‌ها به دست آمد. نتایج نشان داد که زمین‌لغزش‌ها نقش مؤثری در افزایش شدت فرسایش و تولید رسوب در حوضه دارابکلا دارند. کلاس "خیلی زیاد" زمین‌لغزش، با میانگین درجه رسوب‌دهی معادل ۶۱/۳۵ بیشترین نقش را در تولید رسوب دارد؛ در حالی که کلاس "خیلی کم" زمین‌لغزش با میانگین ۴۳/۴۲ کمترین مقدار را دارا می‌باشد. این اختلاف با استفاده از آزمون آماری ANOVA در سطح ۰/۰۱ (p<0.01) معنی‌دار تشخیص داده شد.

از آنجا که مناطق با حساسیت زیاد و خیلی زیاد زمین‌لغزش، به‌طور مستقیم با افزایش درجه رسوب‌دهی در ارتباط هستند؛ پیشنهاد می‌شود از نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش‌ها برای برآورد فرسایش و رسوب حوضه‌های مشابه استفاده شود؛ به طوری که استفاده از نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش به‌عنوان ورودی مدل‌های پیش‌بینی رسوب در حوضه‌های مشابه می‌تواند باعث افزایش دقت در برآورد رسوب سالانه گردد. همچنین با توجه به سهم بالای کلاس‌های حساسیت زیاد زمین‌لغزش‌ها در تولید رسوب، نیاز فوری به اجرای اقدامات مدیریتی و حفاظتی هدفمند در حوضه مورد مطالعه ضروری است. در این راستا پیشنهاد می‌شود، راهکارها بر اساس کلاس حساسیت زمین‌لغزش، میزان رسوب‌دهی و ویژگی‌های محیطی حوضه اجرایی شود. از جمله، مکان‌یابی و اولویت‌بندی اقدامات آبخیزداری بر اساس نقشه حساسیت زمین‌لغزش و نقشه درجه رسوب‌دهی؛ اصلاح شیب دامنه‌ها و پایدارسازی نقاط بحرانی با استفاده از دیواره‌های حائل و زهکشی؛ مدیریت کاربری اراضی به‌ویژه بازگرداندن کاربری‌های تخریب‌شده به حالت جنگلی یا مرتعی در بالادست حوضه؛ پوشش گیاهی حفاظتی با کاشت گونه‌های مقاوم در برابر لغزش مانند درختان عمیق‌ریشه و گونه‌های تثبیت‌کننده خاک می‌توانند در کنار توسعه مدل‌های فرسایشی که نقش مستقیم زمین‌لغزش را لحاظ می‌کنند، دقت پیش‌بینی و اثربخشی برنامه‌های حفاظت خاک را در حوضه‌های مشابه افزایش دهند.

References

Asgari, S., Shadfar, S., & Jafari, M. (2019). Introduction of proper model of land slide relationship on sediment in GolGol basin system. *Environmental Erosion Research*, *9*(2), 89-107. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22517812.1398.9.2.2.8

Bayat, R., Arabkhedri, M., Behnam, N., & Gerami, Z. (2020). Performance evaluation of EPM and MPSIAC Models for determination of Erosion Status of Shahriari Watershed. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, *7*(3), 1-16. [In Persian] http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.7.3.1

Belayneh, L., Dewitte, O., Gulie, G., Poesen, J., O'Hara, D., Kassaye, A., ... & Kervyn, M. (2022). Landslides and gullies interact as sources of lake sediments in a rifting context: Insights from a highly degraded mountain environment. *Geosciences*, *12*(7), 274. https://doi.org/10.3390/geosciences12070274

Bihamta, M. R., & Zare Chahoki, M. A. (2015). *Principle of statistics for the natural resource's science*. Tehran: Tehran University Press. [In Persian]

Campforts, B., Shobe, C. M., Steer, P., Vanmaercke, M., Lague, D., & Braun, J. (2020). HyLands 1.0: a hybrid landscape evolution model to simulate the impact of landslides and landslide-derived sediment on landscape evolution. *Geoscientific Model Development*, *13*(9), 3863-3886. https://doi.org/10.5194/gmd-13-3863-2020

Fathi Ganji, R. (2023). *Assessment of geomorphic factors influencing landslide susceptibility and its role in sediment production: A case study of the Kakasharaf Watershed, Lorestan Province*. (Master's thesis). University of Tehran, Tehran. [In Persian]

Kou, P., Xu, Q., Yunus, A. P., Liu, J., Xu, Y., Wang, C., & Dong, X. (2020). Landslide-controlled soil erosion rate in the largest tableland on the Loess Plateau, China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, *26*(9), 2478-2499. https://doi.org/10.1080/10807039.2019.1710812

Lonigro, T., Gentile, F., & Polemio, M. (2015). The influence of climate variability and land use variations on the occurrence of landslide events (Subappennino Dauno, Southern Italy). *Italian Journal of Engineering Geology & Environment*, *35*, 192-195. https://hdl.handle.net/11586/268816

Motamed Vaziri, B., Valeh, S., & Ahmadi, H. (2023). The Relationship between Erosion Intensity and Geologic Units using Two Models with Different Structures (Case Study: Akhtarabad Watershed). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *12*(3), 41-59. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.78329.1269

Nasiri, M., Mohammadzade, M., Lotfalian, M., & Parsakhoo, A. (2022). Zoning and Field Study of Landslides along Forest Roads of Darabkola-Sari. *Journal of Watershed Management Research*, *13*(26), 105-114. [In Persian] https://doi.org/10.52547/jwmr.13.26.105

Nobakht, M. B. (2016). *Advanced Research Method*. Academic Jihad Publishing Organization. [In Persian]

Peyrowan, H., Shariat Jafari, M., & Lotfollahzadeh, D. (2017). Landslides effect on sediment load amount of Jajrood River. *Watershed Engineering and Management*, *9*(2), 179-189. [In Persian] https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.109724

Ramos-Scharrón, C. E., Arima, E. Y., Guidry, A., Ruffe, D., & Vest, B. (2021). Sediment mobilization by Hurricane-driven shallow landsliding in a wet subtropical watershed. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *126*(5), e2020JF006054. https://doi.org/10.1029/2020JF006054

Shirani, K., & Motaharinia, A. (2016). Investigating the Effect of Landslide on Sediment Production (Case Study: Semirom Padna, Isfahan). Paper presented at the Proceedings of the First International Conference on Natural Hazards and Environmental Crises of Iran, Solutions and Challenges, Ardabil. [In Persian] https://civilica.com/doc/549230/

Talaei, R., Shariat Jafarei, M., & Beyrami, B. (2019). Evaluation of landslides on sediment yield of Balekhlou-Cahy basin in Ardabil Province. *Watershed Engineering and Management, 11*(1), 193-210. [In Persian] https://doi.org/10.22092/ijwmse.2019.118430

Tavoularis, N. (2023). Soil erosion and landslide susceptibility mapping in western Attica, Greece: A rock engineering system approach. *Geosciences, 13*(11), 338. https://doi.org/10.3390/geosciences13110338

Van Westen, C. J., Rengers, N., Terline, M. T. J., & Soaters, R. (1997). Predication of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-Based hazard zonation. *Geologische Rundschau, 86*(2), 404-414.

Xie, J., Coulthard, T., & McLelland, S. (2022). Modelling the impact of seismic triggered landslide location on basin sediment yield, dynamics and connectivity. *Geomorphology, 398*, 108029. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108029

Yan, X., Jiao, J., Li, M., Qi, H., Liang, Y., Xu, Q., … & Wang, H. (2022). Lateral sediment connectivity of landslides occurred under a heavy rainstorm and its influence on sediment yield of slope-channel cascade on the Loess Plateau. *Catena, 216*, 106378. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106378

Yang, S. Y., Jan, C. D., Yen, H., & Wang, J. S. (2019). Characterization of landslide distribution and sediment yield in the TsengWen River Watershed, Taiwan. *Catena, 174*, 184-198. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.011

Vol.14, No.2, Summer 2025, p.266-286 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2024.88908.1501 OPEN ACCESS

Analysis of Eustatic and Geostatic Changes in the Stability of the Caspian Coastal Plain (Case Study: Chalus coastal region)

Mohammad Fathollahzadeh[1], **Mojtaba Yamani**[*2], **Abolghasem Goorabi**[3], **Mehran Maghsoudi**[4], **Mehrnoosh Ghadimi**[5]

[1] PhD Student in Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
[2, 4] Professor in Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran,, Iran
[3, 5] Associate Professor in Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 12 July 2024

Revised: 02 November

Accepted: 04 December 2024

Available Online: 21 March 2025

Keywords:

Caspian sea Coastal Plain

Eustatic Sea Level Changes

Geostatic Land Deformation

Radar Interferometry (InSAR)

ABSTRACT

A series of large-scale and long-term environmental processes, including seismic events, construction activities, land use changes and groundwater extraction, along with climate changes in low-lying coastal areas can lead to deformation, land surface and topographic instabilities. Coastal deltas are part of the landforms and landscapes that, due to the proximity of both land and water environments, leave visible effects against tectonic activities, which are related to things such as changing the pattern and place of formation of deltas due to the change in the course of coastal rivers, the formation of unbalanced coastal terraces in parts of The coast and the emergence of cut beaches in the form of sea loads can be mentioned. In this research, we investigated the geomorphic changes of the coastal plain of Chalus due to eustatic and geostatic activities and their effects on the changes of the plain and coastline in the Chalus region, the results obtained from radar processing, geodynamic data, changes in the level of underground water, geostatic activities, The eustatic changes of the Caspian Sea and the changes in land use show that the Chalus plain has risen under the influence of geostatic activity in the past two decades, and on the other hand, the Chalus coastline has moved towards the sea as a result of the changes in land use and the increase in river sediment load and the decrease in the level of the Caspian Sea. It has been significant that its result is significant in terms of environmental and economic damages.

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

How to cite this article: Fathollahzadeh, M., Yamani, M., Goorabi, A., Maghsoudi, M., & Ghadimi, M. (2025). Analysis of Eustatic and Geostatic Changes in the Stability of the Caspian Coastal Plain (Case Study: Chalus). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(2), 266-286. https://doi.org/10.22067/geoeh.2024.88908.1501

©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

Environmental transformations, including tectonic activities, climate change, excessive groundwater extraction, and land use changes, significantly impact the stability of coastal plains. Due to its strategic location along the Caspian Sea, the Chalus Plain is affected by geostatic changes (including tectonic and seismic activities) and eustatic changes (related to sea level fluctuations). This study examines the impact of these changes on the stability of the Chalus coastal plain.

Material and Methods

This research utilizes radar remote sensing techniques (specifically SBAS and PS InSAR), geodynamic data, Sentinel-1 and Landsat satellite images, GNSS data, and groundwater level measurements. The data, collected between 2017 and 2024, were analyzed to assess surface displacement, groundwater fluctuations, shoreline changes, and land use transformations.

Results and Discussion

Geostatic Changes and Ground Displacement: InSAR analysis revealed that the Chalus Plain has primarily experienced uplift over the past decades, with an average displacement of +2 to +8 mm per year. Geodynamic data confirmed that tectonic and seismic activities associated with the Khazar and Alborz North faults are the main drivers of this displacement.
Impact of Caspian Sea Eustatic Changes: Satellite data analysis indicated that the Caspian Sea level dropped by approximately 2.1 meters between 1992 and 2024. This decline resulted in a shoreline advance of 22 to 385 meters, with the most significant changes occurring at the Chalus River delta and the Nowshahr Port area.
Role of Land Use Changes: Satellite imagery analysis showed a notable reduction in forest cover and an increase in bare land and built-up areas over the past 23 years. These changes have led to increased surface runoff, accelerated soil erosion, greater sediment loads in the Chalus River, and subsequent delta expansion and shoreline advancement.

Conclusion

The findings indicate that the Chalus Plain has undergone significant geostatic and eustatic changes. Tectonic activities have caused land uplift, while sea level decline and increased river sediment loads have contributed to shoreline expansion. To mitigate the adverse effects of these changes, the following measures are recommended: reforestation and vegetation restoration in the Chalus watershed to reduce erosion and sedimentation; diplomatic efforts to secure Caspian Sea water rights from upstream countries (e.g., Russia); and effective land use planning to prevent unregulated urban expansion along the coast.
This study underscores the importance of integrated coastal management and the need for continuous monitoring of geological, hydrological, and land use changes to ensure the sustainability of coastal plains.

جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۲۸۶-۲۶۶ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2024.88908.1501 دسترسی آزاد

تحلیل تغییرات ائواستاتیک و ژئوستاتیک در پایداری جلگهٔ ساحلی خزر (مطالعهٔ موردی: منطقه ساحلی چالوس)

محمد فتح اله زاده[۱]، مجتبی یمانی[۲*]، ابوالقاسم گورابی[۳]، مهران مقصودی[۴]، مهرنوش قدیمی[۵]

[۱] دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
[۲،۴] استاد ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
[۳،۵] دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴

کلمات کلیدی:

جلگه ساحلی دریای خزر

دشت ساحلی

تغییرات سطح دریا (ائوستاتیک)

تغییرات زمین‌شناسی (ژئوستاتیک)

تداخل‌سنجی راداری (InSAR)

چکیده

مجموعه‌ای از فرآیندهای محیطی بزرگ‌مقیاس و طولانی‌مدت، از جمله رخدادهای لرزه‌ای، فعالیت‌های ساختمانی، تغییرات کاربری و برداشت آب‌های زیرزمینی، به همراه تغییرات اقلیمی در مناطق ساحلی کم‌ارتفاع می‌تواند منجر به بروز تغییرشکل، ناپایداری‌های سطح زمین و توپوگرافیک شود. دلتاهای ساحلی جزء لندفرم‌ها و چشم‌اندازهایی هستند که به دلیل مجاورت دو محیط خشکی و آبی در برابر فعالیت‌های تکتونیکی آثار قابل‌مشاهده‌ای از خود برجای می‌گذارند که به مواردی چون تغییر الگو و مکان شکل‌گیری دلتاها به دلیل تغییر مسیر رودخانه‌های ساحلی، شکل‌گیری تراس‌های ساحلی نامتوازن در بخش‌هایی از ساحل و به وجود آمدن سواحل بریده‌شده به‌صورت دریابار می‌توان اشاره کرد. در این پژوهش به بررسی تغییرات ژئومورفیک جلگهٔ ساحلی چالوس ناشی از فعالیت‌های ائوستاتیک و ژئوستاتیک و آثار آنها در تغییرات جلگه و خط ساحلی در محدودهٔ چالوس با استفاده از سنجش از دور راداری (مدل‌های SBAS وPS) و داده‌های ژئودینامیک پرداخته شد که نتایج به دست آمده از پردازش راداری، داده‌های ژئودینامیک، تغییرات سطح تراز آب‌های زیرزمینی، فعالیت‌های ژئوستاتیکی، تغییرات ائوستاتیکی دریای خزر و تغییرات کاربری زمین، نشان می‌دهد جلگهٔ چالوس در دو دههٔ گذشته تحت تأثیر فعالیت ژئوستاتیکی دچار برخاستگی شده است. از طرف دیگر خط ساحلی چالوس در نتیجهٔ تغییرات کاربری و افزایش بار رسوب رودخانه و کاهش تراز سطح دریای خزر به سمت دریا پیشروی قابل توجهی داشته است که نتیجهٔ آن از نظر زیست محیطی و خسارت‌های اقتصادی قابل توجه است. بنابراین احیای پوشش گیاهی و جنگلی در حوضهٔ آبریز چالوس جهت کاهش فرسایش و تولید رسوب و پیگیری دیپلماسی برای دادن حق آبهٔ دریای خزر توسط کشورهای ذینفع بخصوص کشور روسیه می‌تواند مشکلات به وجود آمده را برطرف کند.

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

مقدمه

مجموعه‌ای از فرآیندهای محیطی بزرگ‌مقیاس و طولانی‌مدت، از جمله رخدادهای لرزه‌ای، فعالیت‌های ساختمانی، تغییرات کاربری و برداشت آب‌های زیرزمینی، به همراه تغییرات اقلیمی در مناطق ساحلی کم‌ارتفاع می‌تواند منجر به بروز تغییرشکل، ناپایداری‌های سطح زمین و توپوگرافیک شود (لانگ‌بیچ در ایالات متحده، ونیز در ایتالیا، توکیو در ژاپن، بانکوک در تایلند یا شانگهای در چین) و یا شدت این رخدادها را افزایش دهد (Kanwal, Ding, Wu & Sajjad, 2022). عوامل مختلفی از جمله عوامل انسانی و طبیعی می‌تواند باعث فرونشست در مناطق شهری و روستایی شود مانند بارگذاری سازه و ساختمان‌های سنگین (Hussain et al., 2022)، خصوصیات لیتولوژی و خاکشناسی (Stanley & Clemente, 2014)، استخراج و برداشت بی ضابطهٔ آب‌های زیرزمینی (Hussain et al., 2022)، فعالیت‌های ژئوستاتیک و بهره‌برداری از معادن (Stanley & Clemente, 2014). هر یک از این عوامل می‌تواند تأثیرات منحصر به فردی بر تغییر شکل سطح زمین داشته باشد. امروزه بخش اعظم جلگه‌ها و دلتاهای رودخانه‌ای در ساحل با فرونشست و تسریع فرسایش ساحلی قابل توجهی مواجه هستند که این مسئله خطر دائمی سیل و تغییرات ائوستاتیک دریا را به دلایلی چون تغییر اقلیم و دخالت‌های انسانی در مصب آنها افزایش می‌دهد (Dai, Mei, Darby, Lou & Li, 2018).

مطالعات مورفوتکتونیک به تفسیر ژئودینامیکی و ژئومورفولوژیکی چشم‌اندازها می‌پردازد و به عنوان مدل مهمی برای تکامل چشم‌اندازها، که اولین بار توسط هاک در سال ۱۹۶۰ پیشنهاد شد، عمل می‌کند (Keller & Pinter, 2002). در پژوهش‌های مورفوتکتونیک، رودخانه‌ها و شبکه‌های زهکشی به عنوان شاخص‌های مهمی شناخته می‌شوند، زیرا به وضوح به فعالیت‌های تکتونیکی واکنش نشان می‌دهند. فعالیت‌های ژئوستاتیکی می‌تواند باعث قطع، جدایی، جابجایی یا انحراف مسیر شبکهٔ زهکشی و تغییر الگو و شکل رودخانه‌ها شود (Davis, 1973). شبکه‌های زهکشی قادرند حرکات تکتونیکی اخیر مانند بالاآمدگی و فرونشست را نشان دهند، زیرا کانال‌های رودخانه‌ای به تغییرات شیب توپوگرافیک حساسیت بالایی دارند (Doranti-Tiritan, Hackspacher, de Souza & Siqueira-Ribeiro, 2014).

دلتاهای ساحلی جزء لندفرم‌ها و چشم‌اندازهایی هستند که به دلیل مجاورت دو محیط خشکی و آبی در برابر فعالیت‌های تکتونیکی آثار قابل‌مشاهده‌ای از خود برجای می‌گذارند که به مواردی چون تغییر الگو و مکان شکل‌گیری دلتاها به دلیل تغییر مسیر رودخانه‌های ساحلی، شکل‌گیری تراس‌های ساحلی نامتوازن در بخش‌هایی از ساحل و به وجود آمدن سواحل بریده‌شده به‌صورت دریا بار می‌توان اشاره کرد. ژئومورفولوژی ساحلی در مورد شکل‌گیری اشکال ساحلی (لند فرم‌ها)، فرآیندهای حاکم بر آنها و تغییرات صورت گرفته بر روی آنها بحث می‌کند (Bird, 1999).

ناحیهٔ ساحلی خزر به دلیل شرایط آب‌وهوایی مساعد و بی‌بدیل نسبت به سایر نقاط کشور یعنی اعتدال دمایی در تمام فصول سال یکی از مکانهای با تراکم جمعیت بالا از نظر سکونتگاهی و گردشگری در کشور است. علاوه بر این وجود خاک حاصلخیز و رونق کشاورزی باعث توسعهٔ روزافزون و سریع منطقه و رشد جمعیت در آن شده است. یکی از مسائل طبیعی این ناحیه تغییرات خطوط ساحلی در نتیجهٔ تغییرات تراز آب دریا است که خود نتیجهٔ تغییرات ائوستاتیک و ژئوستاتیک ساحل و دریا است. این تغییرات در یک قرن اخیر بسیار نامنظم بوده است و در برخی اوقات موجب پیشروی ساحل و گاهی نیز موجب عقب‌نشینی قابل توجه ساحل شده است که در هر دو حالت باعث آسیب‌ها و تحمیل هزینه‌هایی به ساکنین این مناطق شده است (Fathollahzadeh, Yamani, Goorabi, Maghsoudi & Ghadimi, 2024).

امروزه، استفاده از تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR) امکان شناسایی تغییرات سطح زمین در مناطق ساحلی، نشست ناشی از فعالیت‌های گسلی، پایش تغییر شکل پوستهٔ زمین براساس گرادیان‌های تغییر شکل و شناسایی گسل‌های فعال را فراهم کرده است (Shi, Liao, Li, Zhang & Cunningham, 2016).

روش‌های اصلی برای اندازه‌گیری و مدل‌سازی جابجایی سطح ساحلی شامل استفاده از تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، تکنیک‌های نقشه‌برداری ژئودتیک و داده‌های سری زمانی است. این روش‌ها امکان پایش دقیق و پیوستهٔ تغییرات ارتفاع سطح زمین را فراهم می‌کند و می‌تواند در مدل‌سازی و پیش‌بینی فرونشست‌ها مورد استفاده قرار گیرد (Shirzaei et al., 2021; Lazecký et al., 2020).

پژوهش‌های مختلفی در زمینهٔ بررسی تغییرات و جابجایی سطح زمین بخصوص در زمینهٔ فرونشست انجام شده است که برخی از آنها عبارتند از: گورابی و همکاران (Goorabi, Karimi, Yamani & Perissin, 2020) در پژوهشی با استفاده از سری تصاویر Sentinel-1 و روش PS به بررسی فرونشست در کلان شهر اصفهان در بازهٔ زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد فرونشست سالانه‌ای بین ۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر در مدت ۵ سال رخ داده که از سمت جنوب به شمال و شمال شرق و شرق روند افزایشی دارد.

رنجبر و فتح اله زاده (Ranjbar Barough & Fathallahzadeh, 2022) در پژوهشی به بررسی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری و ارتباط آن با تغییرات تراز آبهای زیرزمینی در کلان شهر کرج پرداختند که نتایج آن نشان داد بیشترین فرونشست در بخش شمال‌غربی منطقهٔ مورد مطالعه یعنی مهرشهر رخ داده است وکاهش بارش میانگین در این دورهٔ زمانی در کنار برداشت آب زیرزمینی آثار نامطلوبی بر تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی برجای گذاشته و با توجه به خصوصیات بافت خاک منطقه که عمدتاً ریزدانه است در نهایت موجب رخداد فرونشست شده است. در پژوهشی دیگر فتح الهزاده و همکاران (Fathollahzadeh et al., 2024) به شناسایی مناطق فعال تکتونیکی ساحل شرقی خزر با استفاده از سنجش از دور راداری پرداختند که نتایج این تحقیق نشان داد شهرهای گمیشان، بندر ترکمن، بندر گز و لاریم دارای آنومالی قابل‌توجهی به صورت بالاآمدگی و فروافتادگی هستند که علت اصلی این جابجایی‌ها، عملکرد گسل خزر و گسل البرز شمالی است که به صورت شاخه‌های متعدد با سازوکار راندگی (معکوس) و مولفهٔ راستالغز با شیب به سمت جنوب در گسترهٔ استان گلستان مشاهده می‌شود.

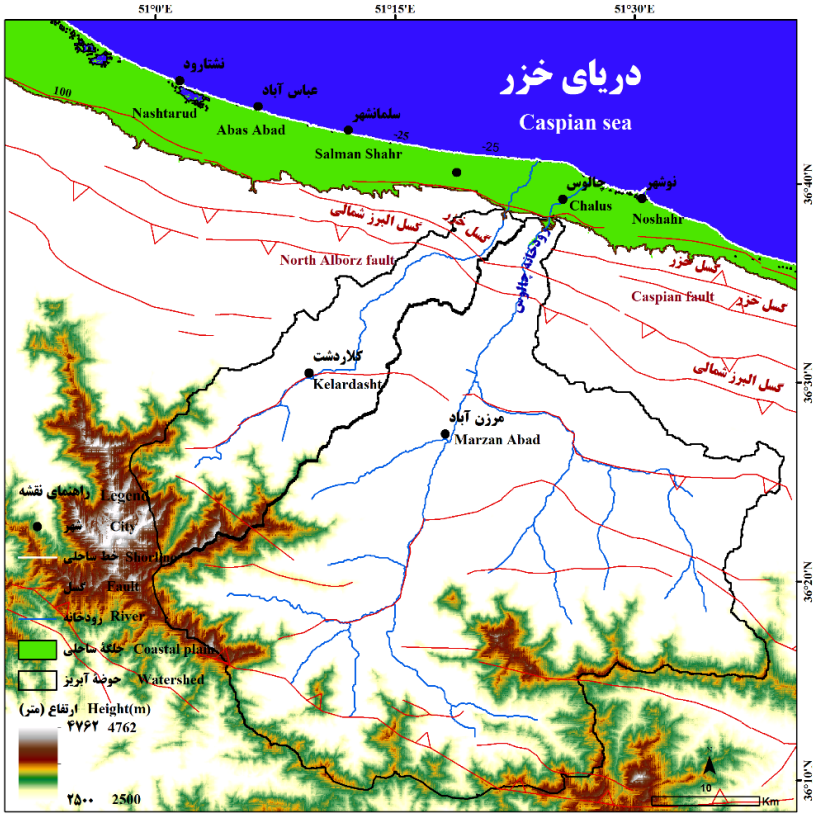
جلگهٔ ساحلی چالوس بدلیل قرارگیری در منطقهٔ فعال تکتونیکی به طور مداوم در معرض تغییرات ژئوستاتیکی قرار دارد از طرفی نوسانات متناوب تراز آب دریای خزر (تغییرات آئوستاتیکی) به عنوان سطح اساس این حوضهٔ آبریز نیز، موجب شده است سواحل منطقه دستخوش تغییرات قابل توجهی شوند که مشکلات زیست محیطی و خسارت‌های اقتصادی زیادی را به همراه داشته است. بنابراین برنامه‌ریزی برای حل این مسائل و ارائهٔ راهکار برای مقابله با اثرات آن انجام این پژوهش علمی را امری ضروری می‌نماید.

این پژوهش به بررسی تغییرات ژئومورفیک جلگهٔ ساحلی چالوس ناشی از فعالیتهای ائواستاتیک و ژئواستاتیک و آثار آنها در تغییر جلگه و خط ساحلی در محدودهٔ چالوس می‌پردازد. برای این امر جابجایی سطح زمین، تغییرات تراز آب زیرزمینی، فعالیتهای ژئوستاتیک (تکتونیک)، تغییرات کاربری اراضی و تغییرات تراز و خط ساحلی دریای خزر (ائوستاتیک) در جلگهٔ چالوس مورد بررسی قرار می‌گیرد.

منطقهٔ مورد مطالعه

جلگهٔ چالوس، واقع در سواحل دریای خزر در شمال ایران و در حد واسط طول جغرافیایی ۵۱ درجه و۱۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۹ دقیقهٔ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۱ دقیقه شمالی قرار گرفته است. این منطقه به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود تحت تأثیر تغییرات قابل توجهی قرار دارد. این تغییرات شامل تغییرات سطح تراز دریا، تغییرات خط ساحلی و عملکرد تکتونیک فعال است که به نظر می‌رسد پیامدهای گسترده‌ای برای زندگی ساکنان محلی و محیط زیست داشته باشد.

رودخانهٔ چالوس مهم‌ترین رودخانهٔ این منطقه است که از ارتفاعات البرز سرچشمه گرفته و پس از عبور از جلگهٔ ساحلی به دریای خزر می‌ریزد. این رودخانه نقش مهمی در تأمین آب کشاورزی و ایجاد تنوع زیستی در جلگه چالوس دارد. این منطقه دارای جنگل‌های انبوه و سرسبز هیرکانی است که در امتداد کوه‌های البرز به سمت جلگه چالوس گسترده شده‌اند. تراکم جمعیت بالا در این منطقه، به دلیل شرایط آب و هوایی مطلوب و خاک حاصلخیز برای زیرساخت‌های گردشگری و کشاورزی، اهمیت درک این فرآیندها را برای رفاه ساکنان و برنامه‌ریزی مؤثر برجسته می‌کند (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقهٔ مورد مطالعه

Fig.1. Geographical location of the study area

ویژگی‌های زمین‌شناسی و تکتونیکی: جلگهٔ ساحلی چالوس به دلیل قرارگیری در محل همگرایی صفحات ایران مرکزی و اوراسیا و حرکت شمال‌غربی حوضهٔ جنوبی خزر از نظر تکتونیکی فعال محسوب می‌شود. این فعالیت‌های تکتونیکی، همراه با خط ساحلی پویای منطقه، باعث دینامیک پیچیدهٔ محیطی در این منطقه شده است. گسل خزر و

البرز شمالی از جمله گسل‌های فعال منطقه هستند که نقش مهمی در تغییرات سطح زمین و بروز زلزله‌های این منطقه دارند.

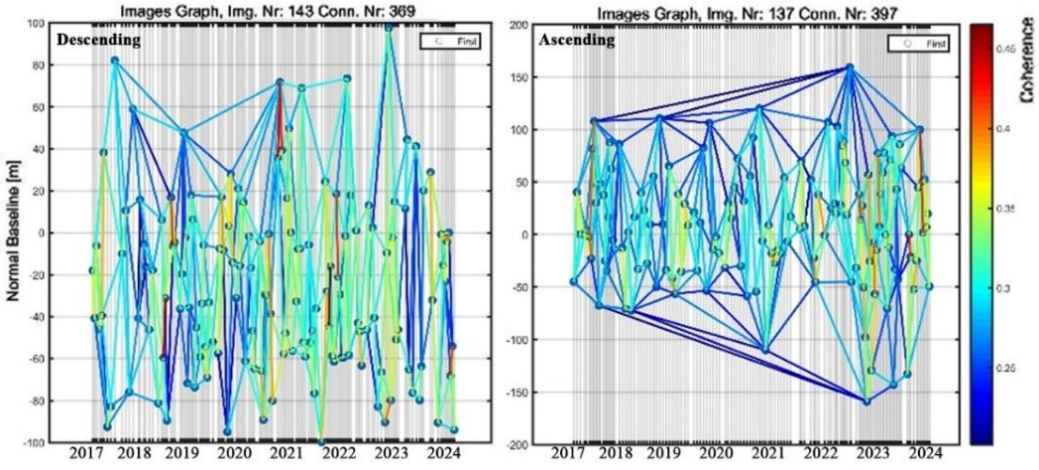
ویژگی‌های آب و هوایی و هیدرولوژیکی: آب و هوای معتدل منطقهٔ چالوس با میانگین بارش سالانه ۷۸۵ میلی‌متر و تغییرات دمایی کم، تاثیرات زیادی در فراهم کردن شرایط مطلوب زندگی و رونق کشاورزی داشته است. حوضه‌های آبریز چالوس و سردآب‌رود نقش مهمی در توسعهٔ جلگهٔ ساحلی چالوس و تغذیه و تأمین منابع آبی منطقه دارند.

تأثیرات انسانی و کشاورزی: عوامل انسانی، مانند توسعهٔ اقتصادی به واسطهٔ تغییرات کاربری زمین و افزایش زمین‌های کشاورزی و نقاط شهری، یکی از چالش‌های محیطی مهم پیشروی جلگهٔ چالوس است. وابستگی منطقه به کشاورزی آب‌بر مانند کشت برنج و افزایش شهرنشینی و توسعهٔ زیرساخت‌های گردشگری، موجب افزایش فشارهای محیطی در این منطقه شده است. تغییرات کاربری زمین به منظور توسعهٔ کشاورزی، شهری و زیرساخت‌های گردشگری، منجر به افزایش هرچه بیشتر تقاضا برای منابع آب و تخریب محیط زیست طبیعی شده است.

مواد و روش‌ها

داده‌های تحقیق

Sentinel-1 سنجندهٔ راداری شامل ۲ ماهواره با دورهٔ بازگشت ۱۲ روزه (ترکیب A و B ۶ روزه) است که در سال ۲۰۱۶ توسط سازمان فضایی اروپا در مدار زمین قرار گرفت است. در این تحقیق، مجموعاً ۱۳۷ تصویر Ascending و ۱۴۳ تصویر Descending باند C از Sentinel-1A در حالت دریافت تداخل‌سنجی عریض (IW) و حالت مشاهدات زمینی توسط اسکن پیشرونده یا حالت (TOPSAR) در مسیرهای ۳۵ و ۲۸ و در دورهٔ زمانی نوامبر ۲۰۱۷ تا ژوئن ۲۰۲۴، جمع‌آوری و استفاده شده است. برای تولید اینترفروگرام‌های تفاضلی و ژئوکدینگ تصاویر از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت ۳۰ متر سنجندهٔ (SRTM) استفاده شد. همچنین در تولید اینترفروگرام‌ها به ترتیب از فواصل زمانی و مکانی ۳۰ روزه و ۸۰ متری استفاده و در مجموع ۳۹۷ اینترفروگرام در مد Ascending و ۳۶۹ در مد Descending تهیه شد (شکل ۲)، (جدول ۱).



شکل ۲- ترکیب تداخل‌سنجی و ارتباط مجموعه تصاویرAscending و Descending تصاویر Sentinel-1 در تکنیک PS-InSAR

Fig.2. Interferometric combination and correlation of ascending and descending Sentinel-1 image sets in the PS-InSAR technique

جدول ۱- ویژگی‌های داده‌های راداری مورد استفاده

Table 1 - Characteristics of the radar data used

Sentinel-1		Parameters
ASCENDING	DESCENDING	Orbit Direction
2017 - 2024	2017 - 2024	Coverage time
28	28	Path
117	35	Frame

داده‌های GNSS

داده‌های ساعتی ایستگاه‌های GNSS از طریق موقعیت‌یابی استاتیک محل ایستگاه با دقت میلی‌متر، می‌توانند به عنوان دادهٔ مرجع برای پایش حرکت سطح زمین در نظر گرفته شوند. جابجایی‌های عمودی روزانه که با تکنیک موقعیت‌یابی دقیق نقطه‌ای (PPP) پردازش می‌شوند می‌توانند برای صحت‌سنجی نتایج بدست آمده از تداخل‌سنجی راداری مورد استفاده قرار گیرند (Wang et al., 2012). در این پژوهش از داده‌های ایستگاه ژئودینامیک نمک‌آبرود به عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه GNSS به جلگهٔ چالوس برای صحت‌سنجی نتایج بدست آمده از تداخل‌سنجی راداری استفاده شد.

تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی

یکی از اهداف این پژوهش بررسی ارتباط جابجایی‌های مشاهده شده سطح زمین و تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی در محدودهٔ جلگهٔ چالوس است. جهت این امر داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای (۱۳ چاه) تراز آب زیرزمینی در بازهٔ زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ منطقهٔ چالوس از شرکت مدیریت منابع آب ایران تهیه و پهنه‌بندی تغییرات تراز آنها با استفاده از روش درون‌یابی IDW (با توجه به اینکه چاههای پیزومتری در منطقهٔ مورد بررسی به صورت نسبتاً یکنواخت پراکنده شده‌اند و بین مقادیر داده‌ها پیوستگی خوبی برقرار است از روش IDW استفاده شد) در محیط نرم‌افزار Arc GIS 8.1 انجام شد. علاوه بر داده‌های راداری Sentinel-1، GNSS و تراز آب زیرزمینی، از مجموعه داده‌های عمومی دیگر شامل نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی، تصاویر اپتیک Sentinel-2 و مجموعه تصاویر Landsat-7,8 (در بازهٔ زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳) نیز برای ارزیابی و بررسی تغییرات کاربری و خط ساحلی جلگهٔ چالوس استفاده شد. در نهایت ادغام این مجموعه داده‌های متنوع، امکان ارزیابی جامع ژئوستاتیک، ائوستاتیک و دینامیک آب‌های زیرزمینی و تغییرات سطح تراز دریای خزر در محدودهٔ جلگهٔ چالوس را فراهم می‌کند.

روش پژوهش

بررسی جابجایی‌های سطح زمینی در جلگه‌های ساحلی به دلیل حساسیت منطقه به فعالیت‌های نئوتکتونیکی، تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی، تغییرات پوشش زمین و تغییرات تراز دینامیکی سطح دریای خزر اهمیت زیادی دارد. این عوامل نه تنها بر پایداری ژئومورفولوژیکی منطقه تأثیرگذار است، بلکه پیامدهای عمیقی برای منابع آب‌های زیرزمینی و اکوسیستم‌های محلی نیز دارند. برای تعیین میزان جابجایی و تغییرات سطح زمین در جلگهٔ ساحلی از روش سری زمانی تغییرات به کمک دو تکنیک SBAS در محیط نرم افزار SARScape و روش PS در محیط نرم افزار Mathlab استفاده شد. تکنیک‌های SBAS و PS InSAR هر یک نقاط قوت خاص به خود را دارند؛ SBAS InSAR معمولا برای پایش مناطق وسیع و بدون عوارض انسان ساخت مناسب است و PS InSAR در پایش دقیق و نقطه به نقطهٔ مناطق شهری و دارای پراکنشگرهای دائم و ثابت مانند ساختمان‌ها و سازه‌های ساخت بشر نتایج بسیار خوبی می‌دهد. با توجه به اینکه جلگهٔ چالوس ترکیبی از عوارض طبیعی و انسان‌ساخت است برای نتیجهٔ بهتر از هر دو روش استفاده شد.

در ادامه جهت پایش تغییرات خط ساحلی دریای خزر در جلگهٔ چالوس از افزونهٔ DSAS در محیط نرم‌افزارArc GIS که توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) برای استخراج پارامترهای آماری در ارزیابی تغییرات خط ساحلی طراحی شده است، درکنار داده‌های تغییرات تراز آب دریای خزر در ۳۰ سال اخیر استفاده کردیم. در نهایت هم با استفاده از سامانهٔ Earth Engine تغییرات کاربری اراضی حوضهٔ آبریز چالوس تعیین و مشخص شد.

تکنیک SBAS InSAR

تکنیک SBAS-InSAR که برای اولین بار توسط برادینو (Berardino, Fornaro, Lanari & Sansosti, 2002) براساس تداخل‌سنجی زوج تصاویر راداری با خط مبنای مکانی_زمانی کمتر مطرح شد. SBAS براساس پایش مداوم تغییر فاصلهٔ بین سنجنده و سطح زمین، تغییرات رخ داده در سطح توپوگرافیک را با توجه به ثابت بودن مدار حرکت سنجنده اندازه‌گیری می‌کند. در اجرای مدلSBAS-InSAR ابتدا مجموعه تصاویر SLC را با توجه به اختلاف مکانی و زمانی مناسب به تعداد ۱۴۳ تصویر Descending از سایت فضایی اروپا (https://search.asf.alaska.edu) دانلود و ابتدا با استفاده از Orbit file تصاویر، تصحیحات مورد نیاز بر روی آنها انجام و پس از آن پردازش بر روی تصاویر Import شده براساس محدودهٔ جلگهٔ ساحلی در محیط نرم‌افزار SARScape انجام شد.

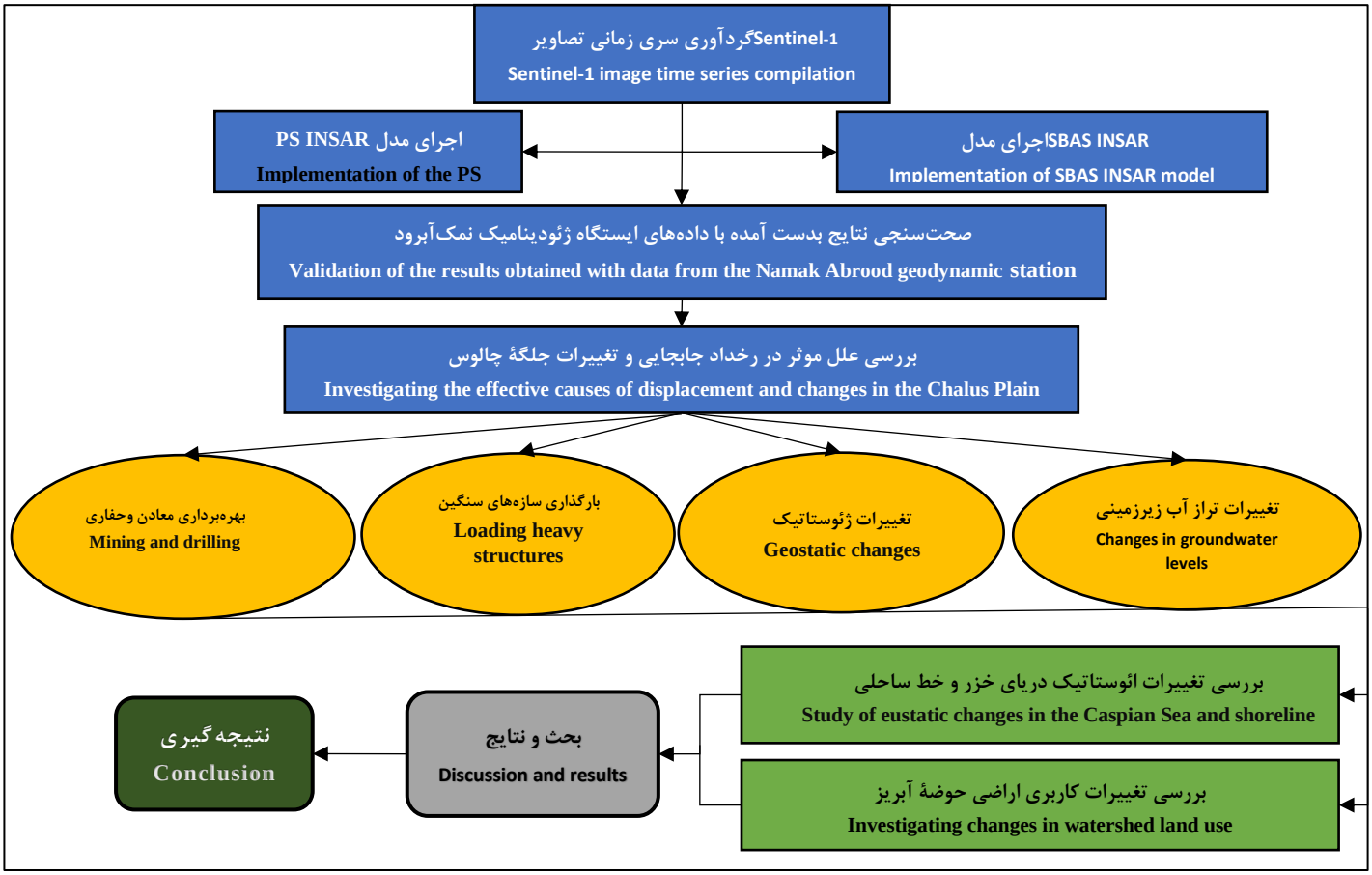
در این مدل مجموعاً ۴۶۲ اینترفروگرام تولید شد و در ادامه برای حذف اثر توپوگرافی از مدل ارتفاعی رقومی ۳۰ متری Aster استفاده و براساس معادلهٔ شمارهٔ (۱) اختلاف فاز تغییرات بین زوج تصاویر ساخته شد:

$$\Delta\varphi top(x,r) = \frac{4\pi}{\lambda}\frac{B\perp(tA,tB)}{Rsin(\theta)}\,\Delta h \qquad (۱)$$

که در آن$B \perp (tA, tB)$ خط مبنای عمودی بین t_A و t_B است، R برد بین هدف زمینی و آنتن سنجنده است، θ زاویه دید و Δh مقدار خطای ارتفاع در هر پیکسل تصویر است که براساس روش تصحیح DEM پیشنهادی توسط برادینو (Berardino et al., 2002) تخمین زده شده است. خطای ارتفاعی فاز با استفاده از معادله (۱) محاسبه و از اینترفروگرام‌ها حذف شده‌اند.

تکنیک PS (Permanent Scattering) Subset InSAR

تکنیک دیگری که برای ارزیابی تغییرات و جابجایی جلگهٔ ساحلی مورد استفاده قرار گرفت، روش پراکنشگرهای دائمی یا PS-InSAR است. این روش بر مبنای شناسایی و ردیابی پراکنشگرهای دائمی سطح زمین مانند ساختمان‌ها، زیرساخت‌ها یا لندفرم‌های طبیعی که خواص بازتابی پایدار در طول زمان دارند تمرکز دارد. با ردیابی این پراکنشگرهای دائمی در تکنیک PS-InSAR ، اندازه‌گیری جابجایی‌های زمین با وضوح بسیار بالا و به صورت نقطه‌ای فراهم می‌شود. اجرای مدل PS بر روی داده‌های Sentinel-1A شامل ۱۳۷ تصویر Ascending و ۱۴۳ تصویر Descending و ترکیب نتایج حاصل از دو جهت به دلیل داشتن دو زاویهٔ دید مختلف و افزایش دقت مکانی نتیجهٔ تداخل‌سنجی انجام شد. ترکیب داده‌های Ascending و Descending باعث کاهش خطاهای ناشی از پوشش زمانی و مکانی تصاویر در محیط نرم‌افزار Mathlab می‌شود (شکل ۳).



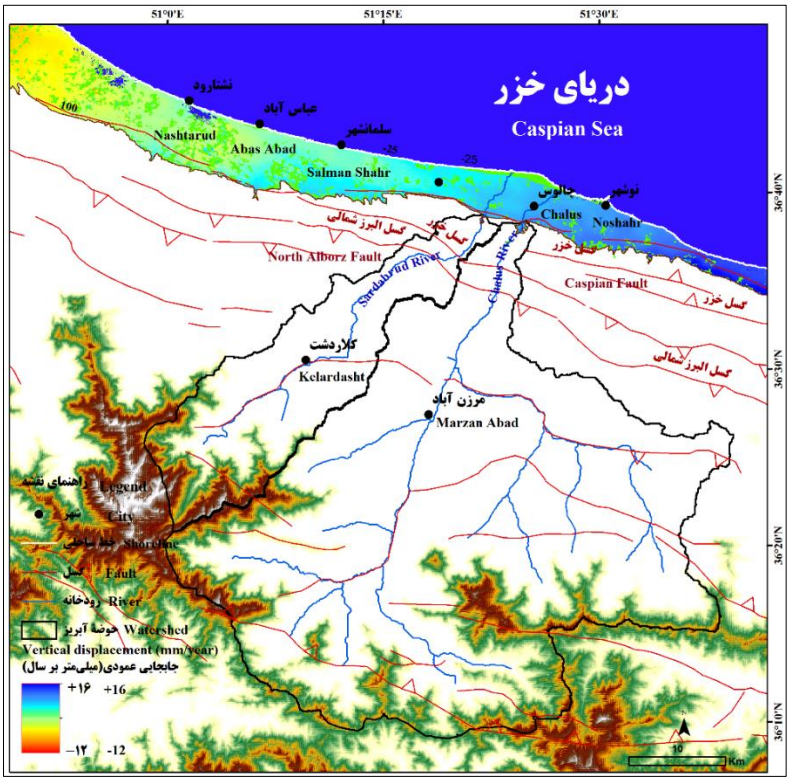
شکل ۳-فلوچارت انجام پژوهش

Fig.3. Research flow chart

نتایج و بحث

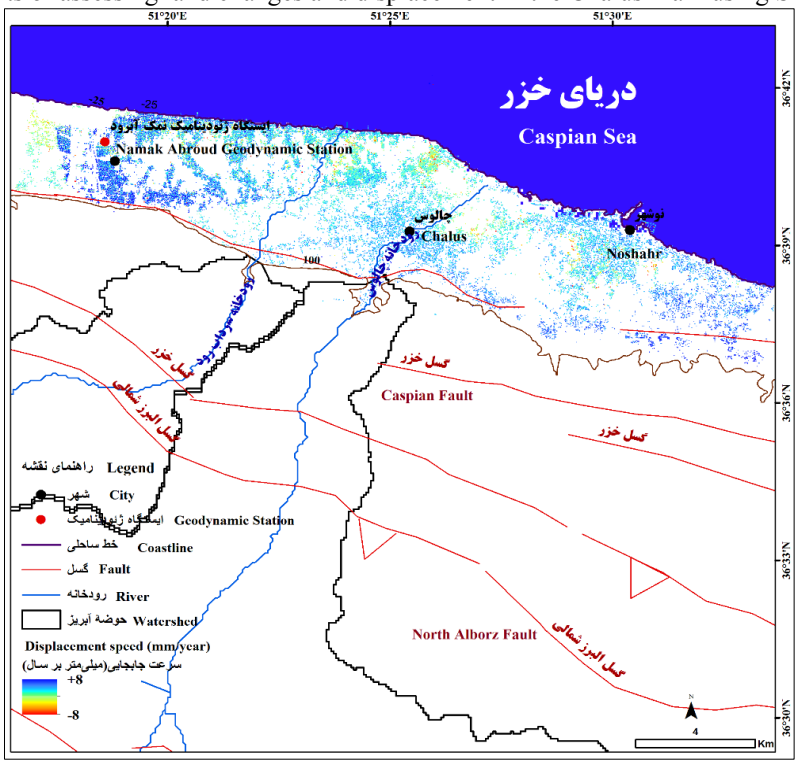
پس از اجرای مدل‌های SBAS و PS InSAR طبق مراحل بیان شـــده در فلوچارت، نتایج جابجایی‌های رخ داده در سـطح جلگهٔ چالوس مشـخص شـد. همانگونه که در شـکل ۴ مشـخص اسـت در محدودهٔ جلگهٔ چالوس طبق خروجی تکنیک SBAS InSAR، جابجایی معادل ۲+ تا ۱۰+ میلی‌متر در سال برخاسـتگی رخ داده اسـت که این روند به سـمت شرق جلگه تشدید شده و به ۱۶+ میلی‌متر در سال هم می‌رسد (شکل۴).

نتایج بدســـت آمده از ترکیب مدل PS InSAR در دو مد Ascending و Descending هم برخاســـتگی در عمدهٔ نقاط جلگه را نشان می‌دهد و تنها در قسمت‌هایی به صورت پراکنده فرونشست‌های موردی رخ داده است. جابجایی مشخص شـــده در مدل PS InSAR در جلگهٔ چالوس بین ۸- تا ۸+ میلی‌متر در ســـال را در بازهٔ زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۴ نشـــان می‌دهد (شکل۵).



شکل۴- نتایج ارزیابی تغییرات و جابجایی زمین در جلگهٔ چالوس با استفاده از SBAS InSAR

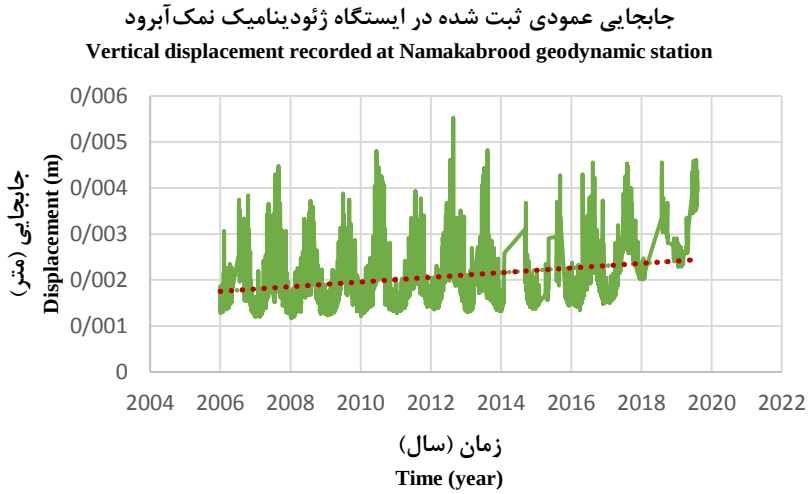
Fig.4. Results of assessing land changes and displacement in the Chalus Plain using SBAS InSAR



شکل۵- نتایج ارزیابی تغییرات و جابجایی زمین در جلگهٔ چالوس با استفاده از PS InSAR

Fig.5. Results of assessing land changes and displacement in the Chalus Plain using PS InSAR

پس از تعیین تغییرات و جابجایی جلگهٔ چالوس با اســـتفاده از تکنیک‌های SBAS و PS InSAR برای اطمینـان و اعتبارسـنجی نتایج بدسـت آمده از تداخل‌سـنجی راداری، از داده‌های ایسـتگاه نمک‌آبرود (به عنوان نزدیکترین ایسـتگاه ژئودینامیکی به جلگهٔ چالوس) استفاده شد (شکل ۶).



شکل ۶- روند جابجایی زمین در ایستگاه ژئودینامیک نمک‌آبرود
Fig.6. Earth movement trend at Namak Abroud Geodynamic Station

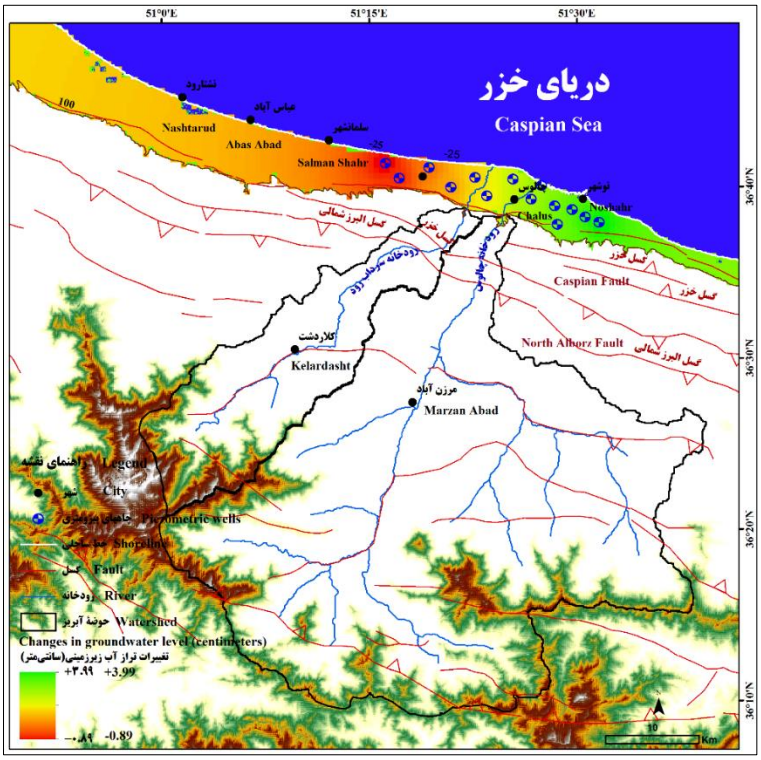
همانطور که در شـکل ۶ مشـخص اسـت روند جابجایی سـطح زمین در محل ایسـتگاه نمک‌آبرود در ۱۲ سـال اخیر به صورت برخاسـتگی و صعودی بوده است. نتایج بدسـت آمده از پردازش راداری (شکل۴ و۵) هم در هر دو مدل SBAS و PS InSAR روند برخاسـتگی را در محل ایسـتگاه ژئودینامیک نمک‌آبرود نشـان می‌دهد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت نتایج بدست آمده از تداخل‌سنجی راداری قابل اعتماد و صحیح است.

پس از اطمینـان از صـــحیح بودن نتایج تداخل‌ســـنجی راداری، برای تعیین علل جابجایی‌های رخ داده در منطقه، عوامل موثر در این تغییرات از جمله کاهش تراز آب زیرزمینی، عامل ژئوستاتیک (تکتونیک فعال)، بهره‌برداری از معادن و منابع زیرزمینی و بارگذاری سازه‌های سنگین و بزرگ در جلگهٔ چالوس مورد بررسی قرار گرفت.

برای بررسی ارتباط بین جابجایی زمین و تغییرات تراز آب زیرزمینی در جلگهٔ چالوس، تغییرات تراز آب در چاه‌های پیزومتری اطراف جلگهٔ چالوس (۱۳ چاه) در بازهٔ زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ مورد پایش قرار گرفت (شکل ۷).

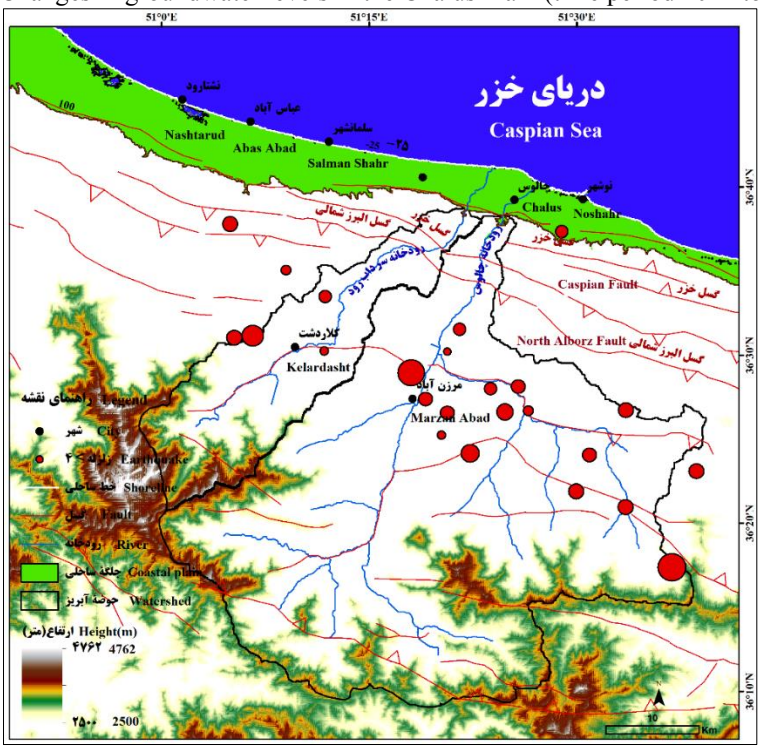
همانطور که در شـکل۷ مشـاهده می‌شـود تراز آب زیرزمین در جلگهٔ چالوس و اطراف آن در بازهٔ زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ بین ۳/۹۹+ تا ۰/۸۹- تغییر کرده است که هر چه به سمت شرق جلگه حرکت می‌کنیم افزایش تراز بیشتر و هر چه به سـمت غرب جلگه حرکت کنیم کاهش تراز آب زیرزمینی رخ داده اسـت این در حالی اسـت که در بخش اعظم جلگهٔ چالوس برخاستگی اتفاق افتاده است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تغییرات تراز آب زیرزمینی در جلگهٔ چالوس ارتباط چندانی بر جابجایی سطح زمین نداشته است.

با توجه به اینکه تأثیر بارگذاری سازه‌های سنگین و بهربرداری از معادن تنها در فرونشست زمین موثر است و نتایج پایش راداری و ژئودینامیک تنها برخاســـتگی زمین در محدودهٔ مورد مطالعه را نشـــان می‌دهد بنابراین این عوامل از فاکتورهای موثر در جابجای سطح جلگهٔ چالوس حذف و در پژوهش مورد بررسی قرار نمی‌گیرند.



شکل ۷- تغییرات تراز آب زیرزمین در جلگهٔ چالوس (بازهٔ زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴)

Fig.7. Changes in groundwater levels in the Chalus Plain (time period 2014 to 2024)

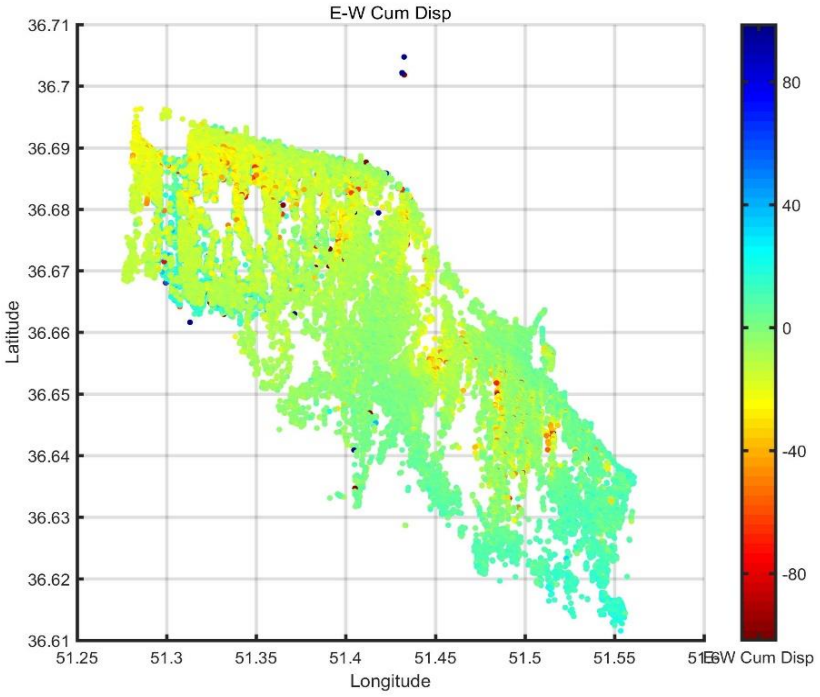


شکل ۸- رخداد زلزله (با بزرگای بیشتر از۴ ریشتر) در محدودهٔ منطقهٔ مورد مطالعه (بازهٔ زمانی ۱۹۰۰تا ۲۰۲۴)

Fig.8. Earthquake occurrence (with a magnitude greater than 4 on the Richter scale) within the study area (time period 1900 to 2024)

یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر جابجایی زمین، تغییرات ژئوستاتیک تحت تأثیر تکتونیک است. برای تعیین تأثیر تکتونیک در جابجایی جلگهٔ چالوس، لرزه‌خیزی و نحوهٔ عملکرد گسل‌های منطقه مورد بررسی قرار گرفت. مهمترین گسل‌های قرار گرفته در محدودهٔ جلگهٔ چالوس دو گسل اصلی خزر والبرز شمالی است که به صورت غربی_شرقی و در جنوب جلگهٔ چالوس قرار گرفته‌اند. از مصادیق تکتونیک فعال در یک منطقه رخداد زلزله در آن منطقه است که معمولاً جابجایی‌های ناشی از آن می‌تولند قلبل توجه باشد. برای ارزیابی تکتونیک فعال در جلگهٔ چالوس پیشینهٔ رخداد زلزله‌های با بزرگای بیشتر از ۴ ریشتر از سال ۱۹۰۰ تاکنون مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۸).

با توجه به شکل ۸ اکثر کانون‌های زلزلهٔ رخ داده در منطقه، اطراف گسل‌های اصلی این ناحیه است که نتیجهٔ آن حرکات صفحات دو طرف گسل و رخداد جابجایی سطح می‌باشد. جلگهٔ چالوس در مرز بین صفحهٔ تکتونیکی ایران و صفحهٔ اوراسیا (کف دریای خزر) قرار دارد که همگرایی این صفحات باعث فشارهای تکتونیکی و فعالیت‌های لرزه‌ای می‌شود. این فعالیت‌ها به نوبهٔ خود منجر به جابجایی‌های عمودی و افقی زمین در جهت E-W (شرق به غرب) و N-S (شمال به جنوب) می‌شود. براساس نتایج ارزیابی ترکیبی، جابجایی افقی منطقهٔ مورد مطالعه طی بازه زمانی ۲۰۱۷-۲۰۲۴ مشخص شد (شکل۹).



شکل۹- جابجایی زمین در جهت شرقی-غربی به کمک تکنیک ترکیبی Ascending و Descending (بازهٔ زمانی ۲۰۱۷-۲۰۲۴)

Fig.9. Earth movement in the east-west direction using the combined Ascending and Descending technique (time period 2017-2024)

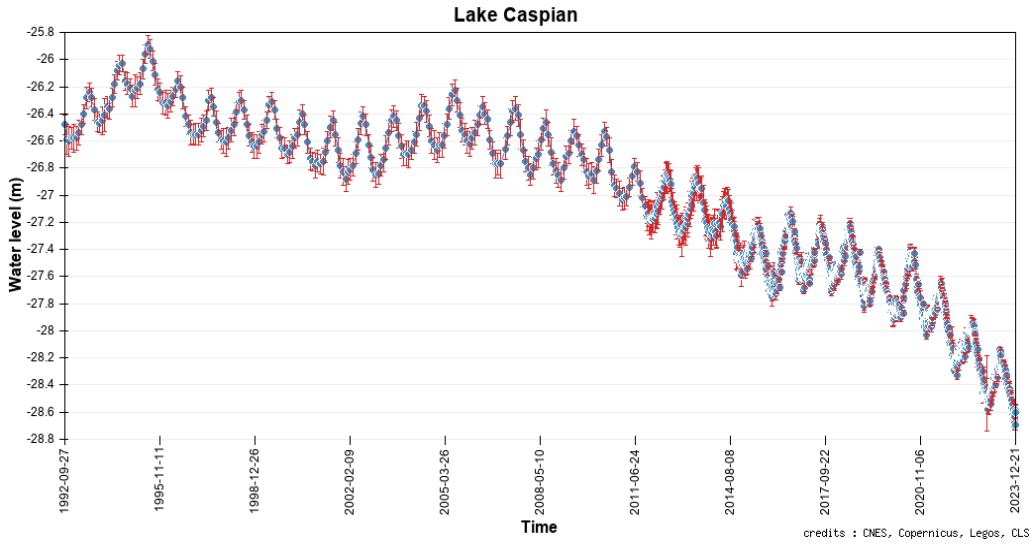
همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است بخش عمدهٔ جابجایی افقی جلگهٔ چالوس به صورت غربی_شرقی است و تنها بخشهایی به صورت پراکنده دارای جابجایی شرقی_غربی هستند که محدودهٔ این جابجایی‌ها بین ۸۰+ تا ۸۰- میلی‌متر در سال است.

در ادامه برای شناسایی عوامل موثر دیگر در رخداد جابجایی جلگهٔ چالوس، اطلاعات زمین‌شناسی محدودهٔ مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد گسل‌های اطراف جلگهٔ چالوس از نوع تراستی هستند که عملکرد آنها موجب برخاستگی منطقه شده است. از طرفی باتوجه به اینکه فرونشستی در منطقه رخ نداده است بنابراین نیازی به بازدید منطقه از نظر بهره‌برداری از معادن و کاربری زمین از جهت بارگذاری سازه‌ها و ساختمان‌های بزرگ و سنگین که از عوامل موثر در رخداد فرونشست زمین هستند، نیست.

تغییرات تراز و خط ساحلی دریای خزر

یکی دیگر از عوامل اثرگذار در تغییر و تحول جلگهٔ ساحلی در منطقهٔ چالوس، تغییرات سطح تراز دریای خزر است که با استفاده از داده‌های تاریخی و مدل‌های پیش‌بینی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که سطح دریای خزر در طول دورهٔ مطالعه (۲۰۲۳-۲۰۰۰) نوسانات قابل توجهی داشته است. این نوسانات ناشی از تغییرات اقلیمی، میزان بارش، تبخیر و تغییرات ورودی رودخانه‌ها به خصوص رودخانهٔ ولگا به دریای خزر است. افزایش سطح تراز دریا در برخی دوره‌ها منجر به پسروی ساحل شده است، که تأثیرات قابل توجهی بر محیط زیست و زیرساخت‌های ساحلی مانند جاده‌ها، بنادر و تأسیسات گردشگری برجای گذاشته است.

برای ارزیابی تغییرات تراز دریای خزر از سامانهٔ پایش سطح تراز آب دریاها و دریاچه‌های بزرگ جهان (هیدرووب) که توسط داده‌های ارتفاع‌سنج ماهواره‌ای و از طریق الگوریتم خودکار با ترکیب مشاهدات سنجنده‌های مختلف از جمله SARAL/AltiKa ، Jason-1,2,3 ، Geosat Follow-On، Sentinel-6 عمل می‌کنند، استفاده شده است. نتایج بررسی‌ها در طول ۳۰ سال، کاهش قابل توجه تراز دریای خزر در کنار تغییرات فصلی پرنوسان را نشان می‌دهد به طوریکه سطح تراز دریا از ۲۶.۶- در سال ۱۹۹۲ به ۲۸.۷- در سال ۲۰۲۳ رسیده است (شکل ۱۰).



شکل۱۰- تغییرات تراز دریای خزر(سانتی‌متر) مشاهده شده توسط سامانهٔ ارتفاع‌سنج ماهواره‌ای هیدرووب

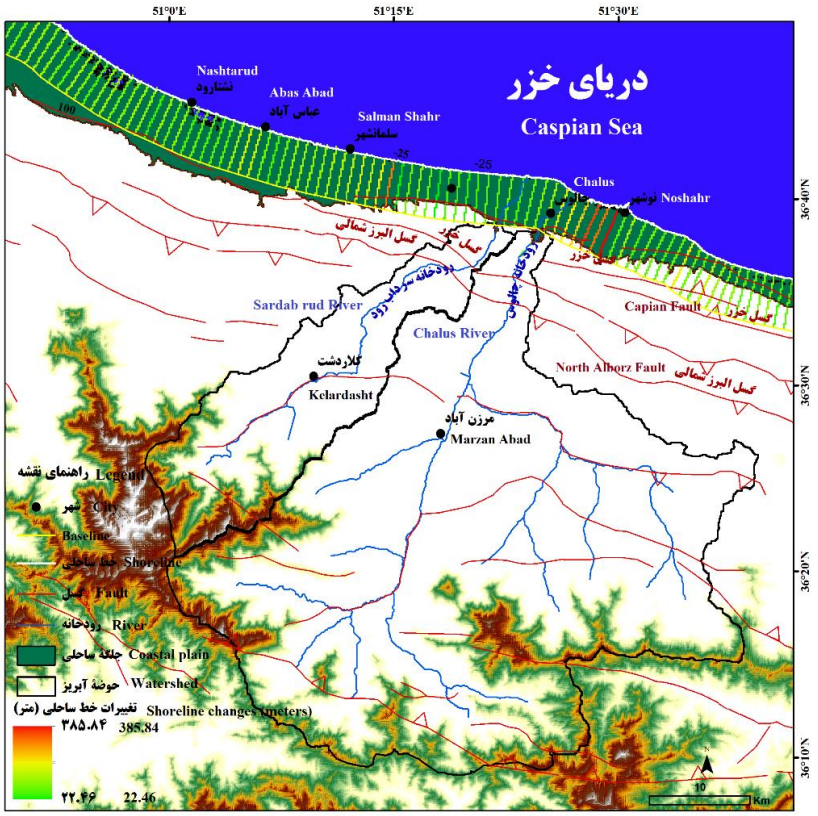
Fig.10. Changes in the level of the Caspian Sea (centimeters) observed by the Hydroweb satellite altimeter system

کاهش تراز دریای خزر در سالهای اخیر که ناشی از کم شدن میلیون‌ها متر مکعب آب دریای خزر است باعث کاهش نیروی فشاری ناشی از آب دریا و شکل گرفتن تعادل ایزوستازی جدیدی در ناحیه شده است.

در سطح جهان نیز مطالعات مشابهی در مناطق ساحلی انجام شده است که بر این موضوع تاکید دارند که نوسانات سطح دریا می‌تواند منجر به تغییرات سطح ساحلی و جابجایی‌های زمین شود. به عنوان مثال، تحقیقات در منطقهٔ دلتای مکونگ توسط سیویتسکی و همکاران (Syvitski et al., 2009) و در منطقه دلتای نیل توسط استنلی و وارن (Stanley & Warne, 1998) نشان داد که افزایش سطح تراز دریا باعث فرسایش ساحلی و جابجایی‌های زمین در این مناطق شده است.

از طرف دیگر کاهش تراز دریای خزر به عنوان سطح اساس رودخانه‌های جلگهٔ خزر باعث افزایش نیروی کاوشی و عمیق شدن کانال رودخانهٔ چالوس و سرداب‌رود شده است که نتیجهٔ آن ورود بیشتر رسوبات به دریای خزر و پیشروی بیشتر ساحل است.

در ادامه برای بررسی اثر کاهش تراز دریای خزر بر تغییرات خط ساحلی در جلگهٔ چالوس با استفاده از افزونه DSAS پرداختیم. برای این امر ابتدا خطی با فاصلهٔ یکسان از خطوط ساحلی به عنوان خط مبنا (Baseline) مشخص شد سپس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-7,8, Sentinel-2 وآرشیو تصاویر Google earth خطوط ساحلی در بازهٔ زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۴ استخراج و با استفاده از ترانسکت‌های هم فاصله بین خطوط ساحلی و Baseline، تغییرات خط ساحل (SCE[1]) در جلگهٔ چالوس تعیین و مشخص شد (شکل ۱۱).



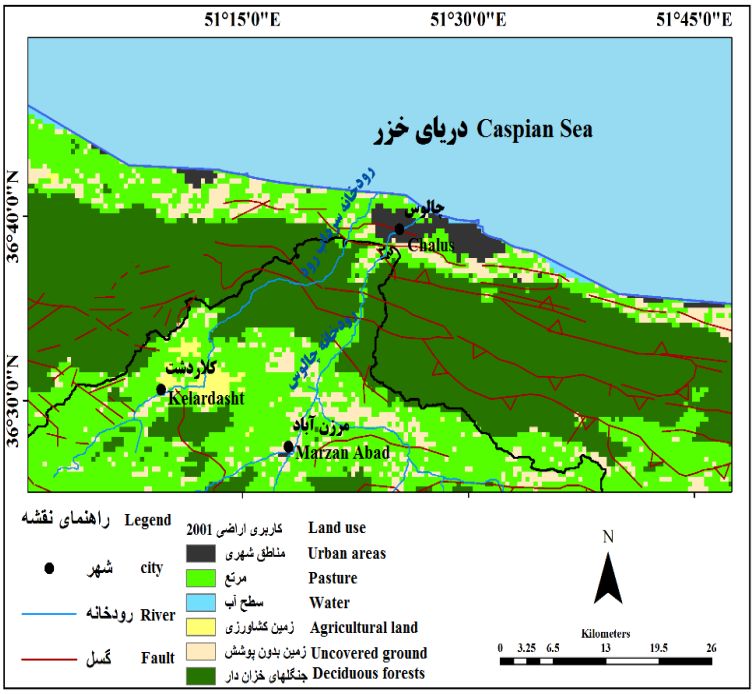
شکل۱۱- تغییرات خط ساحلی(SCE) در جلگهٔ ساحلی چالوس در بازهٔ زمانی ۱۹۹۲-۲۰۲۴

Fig.11. Shoreline changes (SCALE) in the Chalus coastal plain during the period 1992-2024

1-Shoreline Change Envelope (m)

همانطور که در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ مشخص است، همراه با کاهش سطح تراز دریای خزر در ۳۰ سال گذشته، خطوط ساحلی بین ۲۲/۴۶ تا ۳۸۵/۸۴ متر پیشروی کرده است که بیشترین پیشرفت خط ساحلی در دلتای رودخانهٔ چالوس و قسمت شرقی آن تا اسکلهٔ نوشهر مشاهده می‌شود. این رویداد نتیجهٔ جریان دینامیک دریای خزر در جهت خلاف عقربه‌های ساعت است که موجب شده جریان‌های رسوبی رودخانهٔ چالوس در پشت دیوارهٔ اسکله نوشهر تجمع پیدا کند و پیشروی خط ساحلی در این بخش بیشتر از سایر قسمت‌ها باشد.

یکی دیگر از عوامل مؤثر در پیشروی خط ساحلی جلگهٔ چالوس، افزایش بار رسوبی در رودخانهٔ چالوس است که عمدتاً به دلیل تغییرات کاربری زمین و به ویژه تبدیل جنگل‌های انبوه و مراتع به زمین‌های کشاورزی و بدون پوشش رخ داده است. برای بررسی تغییرات کاربری زمین در جلگهٔ چالوس بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳، از تصاویر سنجندهٔ MODIS و روش نظارت شده (Supervised) در محیط Google Earth Engine استفاده شد (شکل ۱۲ و۱۳).

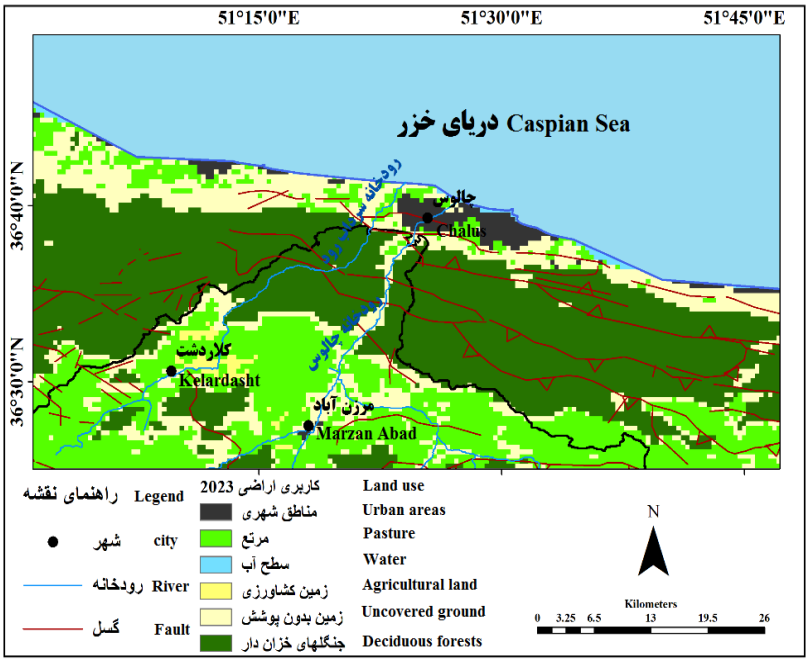


شکل ۱۲– نقشهٔ کاربری اراضی سال ۲۰۰۱ (تصاویر مودیس)

Fig.12. Land use map of 2001 (MODIS images)

همانطور که در شکل ۱۲ و ۱۳ و جدول ۲ مشاهده می‌شود از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ تغییر پوشش جنگلی به زمین بدون پوشش بخصوص در حاشیهٔ رودخانهٔ چالوس افزایش قابل توجهی داشته است. همچنین توسعهٔ شهری و زیرساخت‌های گردشگری در منطقه نیز گسترش یافته است که این تغییرات به ویژه در مناطق ساحلی و نواحی نزدیک به جاده‌های اصلی مشاهده می‌شود. تحلیل داده‌های Landsat -7,8 و Sentinel-2 نشان داد که مساحت زمین‌های بدون پوشش در دشت چالوس از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ به شدت افزایش یافته است (جدول۲). این تغییرات کاربری باعث کاهش نفوذپذیری زمین و افزایش رواناب سطحی شده است. عمدهٔ این تغییرات که ناشی از دخالت انسان در تخریب و تغییر کاربری اراضی است در سال‌های اخیر باعث افزایش رخداد سیل و طغیان رودخانهٔ چالوس شده است که نتیجهٔ آن افزایش چشمگیر فرسایش و ورود رسوبات آبرفتی به جریان ورودی دریای خزر بوده است.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت یکی از دلایل پیشروی ساحل و گسترش دلتای رودخانه در جلگهٔ چالوس تغییرات کاربری اراضی و کاهش پوشش گیاهی در حوضهٔ آبریز چالوس است.



شکل ۱۳- نقشهٔ کاربری اراضی سال ۲۰۲۳ (تصاویر مودیس)

Fig.13. Land use map for 2023 (MODIS images)

جدول ۲- تغییرات مساحت کاربری اراضی (کیلومتر مربع)

Table 2- Changes in land use area (KM^2)

کاربری اراضی Land use	مساحت سال ۲۰۰۱ Area in 2001	مساحت سال ۲۰۲۳ Area in 2023	تغییر مساحت Change Area
مناطق شهری Urban areas	(0.168)	(0.237)	(0.069)
مرتع Pasture	(3.807)	(2.913)	(-0.894)
آب Water	(3.394)	(3.338)	(-0.056)
زمین کشاورزی Agricultural land	(0.0593)	(0.0448)	(-0.0082)
زمین بدون پوشش Uncovered ground	(0.731)	(1.7305)	(0.9995)
جنگلهای خزان دار Deciduous forests	(4.293)	(4.189)	(-0.104)

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، عوامل مختلف تأثیرگذار بر تغییرات جلگهٔ ساحلی چالوس مورد بررسی قرار گرفت. برای این امر ابتدا جلگهٔ ساحلی چالوس با استفاده از تداخل‌سنجی راداری از نظر جابجایی‌ها (فرونشست و بالاآمدگی) مورد بررسی و پایش قرار گرفت که نتایج نشان داد به طور میانگین بین ۲+ تا 8+ میلی‌متر در سال دچار جابجایی شده است و بخش عمدهٔ مساحت جلگه دارای برخاستگی است.

با توجه به اینکه تأثیر بارگذاری سازه‌های سنگین و بهربرداری از معادن تنها در فرونشست زمین موثر است و نتایج پایش راداری و ژئودینامیک تنها برخاستگی زمین در محدودهٔ مورد مطالعه را نشان می‌دهد بنابراین این عوامل از فاکتورهای موثر در جابجای سطح جلگهٔ چالوس حذف و در پژوهش مورد بررسی قرار نگرفت.

همچنین بررسی وضعیت سطح تراز آبهای زیرزمینی در جلگهٔ چالوس نشان داد که تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی در این ناحیه بسیار ناچیز است و در بیشتر قسمت‌ها، به ویژه در جلگهٔ چالوس، سطح آب زیرزمینی در چند سال اخیر حدود ۳/۹۹ سانتی‌متر افزایش یافته است. بنابراین، جابجایی‌های مشاهده شده در جلگهٔ چالوس با تغییرات سطح آب زیرزمینی، به جزء دربرخی پهنه های کوچک محلی، ارتباطی ندارد.

در ادامه وضعیت ژئوستاتیک منطقه، شبکهٔ گسل‌ها و تاریخچهٔ زمین‌لرزه‌ها در صدهٔ گذشته مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد در سالهای اخیر فعالیت گسلهای فعال خزر و البرز شمالی موجب وقوع زمین‌لرزه‌های متعدد با بزرگای بیش از ۴ ریشتر شده است. مجموع این داده‌ها نشان می‌دهد که جلگهٔ چالوس از نظر ژئوستاتیکی فعال است و سازوکار گسلهای منطقه از نوع تراستی است که نتیجهٔ عملکرد آنها موجب برخاستگی منطقه شده است.

همچنین بررسی تغییرات سطح تراز دریای خزر به عنوان یکی دیگر از عوامل موثر در تغییرات جلگهٔ چالوس در ۳۰ سال گذشته نشان‌دهندهٔ یک روند کاهشی قابل توجه در کنار تغییرات فصلی پرنوسان است به طوریکه سطح تراز دریا از ۲۶/۶- در سال ۱۹۹۲ به ۲۸/۷- در سال ۲۰۲۴ افت کرده است. پیامد این تغییر سطح اساس افزایش عمق بستر رودخانه ها و پیشروی خطوط ساحلی در جلگهٔ چالوس بین ۲۲/۴۶ تا ۳۸۵/۸۴ متر بوده است که بیشترین پیشروی در دهانهٔ رودخانهٔ چالوس و بخش شرقی آن تا اسکله نوشهر رخ داده است.

در نهایت تغییرات کاربری زمین در حوضهٔ آبریز چالوس در ۲۳ سال گذشته نشان داد مساحت جنگل‌های متراکم بخصوص در حاشیهٔ رودخانهٔ چالوس کاهش قابل توجه داشته است؛ همچنین مراتع و حاشیه‌های جنگل‌ها به تدریج به زمین‌های بدون پوشش و سازه‌های انسان ساخت تبدیل شده‌اند که باعث افزایش رخداد سیلاب و فرسایش و تولید رسوب بیشتر در رودخانهٔ چالوس شده است که نتیجهٔ آن توسعه و پیشروی دلتای رودخانهٔ چالوس در دریای خزر بوده است.

نتایج به دست آمده از پردازش راداری، داده‌های ژئودینامیک، تغییرات سطح تراز آب‌های زیرزمینی، فعالیت‌های ژئوستاتیکی، تغییرات ائوستاتیکی دریای خزر و تغییرات کاربری زمین، نشان می‌دهد جلگهٔ چالوس در دو دههٔ گذشته تحت تأثیر فعالیت ژئوستاتیکی دچار برخاستگی شده و از طرف دیگر خط ساحلی چالوس در نتیجهٔ تغییرات کاربری و افزایش بار رسوب رودخانه و کاهش تراز سطح دریای خزر به سمت دریا پیشروی قابل توجهی داشته است که نتیجهٔ آن از نظر زیست محیطی و خسارت‌های اقتصادی قابل توجه است.

پیشنهادات: با توجه به اینکه برخی عوامل انسانی ارتباط مستقیم با کاهش تراز دریای خزر (ایجاد سد بر ورودی‌های دریای خزر) و افزایش بار رسوبی رودخانه‌های (تغییرات کاربری و کاهش مساحت پوشش جنگلی) منتهی به جلگهٔ ساحلی خزر دارند بنابراین احیای پوشش گیاهی و جنگلی در حوضهٔ آبریز چالوس جهت کاهش فرسایش و تولید رسوب و پیگیری دیپلماسی برای دادن حق‌آبهٔ دریای خزر توسط کشورهای ذینفع بخصوص کشور روسیه می‌تواند مشکلات به وجود آمده را برطرف کند.

References

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

Bird, E. (1999). *Coastal geomorphology: an introduction*. Wieley. https://www.wiley.com/en-ae/Coastal+Geomorphology%3A+An+Introduction%2C+2nd+Edition-p-9780470517291

Cigna, F., Osmanoğlu, B., Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Ávila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H., ... & Wdowinski, S. (2012). Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico. Remote Sensing of Environment, 117, 146-161. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.005

Dai, Z., Mei, X., Darby, S. E., Lou, Y., & Li, W. (2018). Fluvial sediment transfer in the Changjiang (Yangtze) river-estuary depositional system. *Journal of Hydrology*, *566*, 719-734. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.019

Davis, W. M. (1973). The Geographical Cycle. In: Derbyshire, E. (eds) Climatic Geomorphology. The Geographical Readings Series. London: Palgrave. https://doi.org/10.1007/978-1-349-15508-8_2

Doranti-Tiritan, C., Hackspacher, P. C., de Souza, D. H., & Siqueira-Ribeiro, M. C. (2014). The use of the stream length-gradient index in morphotectonic analysis of drainage basins in Poços de Caldas Plateau, SE Brazil. *International Journal of Geosciences*, *5*(11), 1383-1394. http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2014.511112

Fathollahzadeh, M., Yamani, M., Goorabi, A., Maghsoudi, M., & Ghadimi, M. (2024). Identifying the active tectonic areas of the eastern Caspian coast using radar remote sensing. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, *33*(130), 65-78. https://doi.org/10.22131/sepehr.2024.2009124.3010

Goorabi, A., Karimi, M., Yamani, M., & Perissin, D. (2020). Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-1A InSAR observations. *Journal of Arid Environments*, *181*, 104238. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104238

Hussain, M. A., Chen, Z., Shoaib, M., Shah, S. U., Khan, J., & Ying, Z. (2022). Sentinel-1A for monitoring land subsidence of coastal city of Pakistan using Persistent Scatterers In-SAR technique. *Scientific Reports*, *12*(1), 5294. https://doi.org/10.1038/s41598-022-09359-7

Kanwal, S., Ding, X., Wu, S., & Sajjad, M. (2022). Vertical ground displacements and its impact on erosion along the Karachi coastline, Pakistan. *Remote Sensing*, *14*(9), 2054. https://doi.org/10.3390/rs14092054

Keller, E. A., & Pinter, N. (2002). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift and Landscape*. Prentice Hall.https://books.google.com/books/about/Active_Tectonics.html?id=sXASAQAAIAAJ

Lazecký, M., Spaans, K., González, P. J., Maghsoudi, Y., Morishita, Y., Albino, F., ... & Wright, T. J. (2020). LiCSAR: An automatic InSAR tool for measuring and monitoring tectonic and volcanic activity. *Remote Sensing*, *12*(15), 2430. https://doi.org/10.3390/rs12152430

Ranjbar Barough, Z., & Fathallahzadeh, M. (2022). Investigation of land subsidence, using time series of radar images and its relationship with groundwater level changes (Case study: Karaj metropolis). *Quantitative Geomorphological Research, 10*(4), 138-155. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1401.10.4.8.3

Shi, X., Liao, M., Li, M., Zhang, L., & Cunningham, C. (2016). Wide-area landslide deformation mapping with multi-path ALOS PALSAR data stacks: A case study of three gorges area, China. *Remote Sensing*, *8*(2), 136. https://doi.org/10.3390/rs8020136

Shirzaei, M., Freymueller, J. T., Törnqvist, T. E., Galloway, D. L., Dura, T., & Minderhoud, P. S. J. (2021). Measuring, modelling and projecting coastal land subsidence. *Nature Reviews Earth & Environment, 2*(1), 40-58. https://doi.org/10.1038/s43017-020-00115-x

Stanley, D. J., & Warne, A. G. (1998). Nile Delta in its destruction phase. *Journal of Coastal Research*, *14*(3), 795-825. https://www.jstor.org/stable/4298835

Stanley, J. D. (2005). Growth faults, a distinct carbonate-siliciclastic interface and recent coastal evolution, NW Nile Delta, Egypt. *Journal of Coastal Research*, 42, 309-318. https://www.jstor.org/stable/25736997

Stanley, J. D., & Clemente, P. L. (2014). Clay distributions, grain sizes, sediment thicknesses, and compaction rates to interpret subsidence in Egypt's northern Nile Delta. *Journal of Coastal Research*, *30*(1), 88-101. https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00146.1

Syvitski, J. P., Kettner, A. J., Overeem, I., Hutton, E. W., Hannon, M. T., Brakenridge, G. R., ... & Nicholls, R. J. (2009). Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience*, *2*(10), 681-686. https://doi.org/10.1038/ngeo629

Wang, H., Wright, T. J., Yu, Y., Lin, H., Jiang, L., Li, C., & Qiu, G. (2012). InSAR reveals coastal subsidence in the Pearl River Delta, China. *Geophysical Journal International*, *191*(3), 1119-1128. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05687.x

Vol.14, No.2, Summer 2025, p.287-307 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2025.85880.1443 OPEN ACCESS

Investigating the Ground Displacement Caused by Earthquakes Using Radar Interferometry: A Case Study of Ilam Province and the Mountain Front Fault

Zahra Kal Mishi [1], Iman Rousta [2]*, Rahman Zandi [3]

[1 & 2] Faculty of Geography, Yazd University, Yazd, Iran
[3]Department of Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 14 December 2023

Revised: 24 March 2025

Accepted: 06 April 2025

Available Online: 10 April 2025

Keywords:

Dehloran

Synthetic Aperture Radar (SAR)

Earthquake-Induced Ground Deformation

Active Faults

Sentinel-1A Satellite

ABSTRACT

One of the most significant impacts of earthquakes is ground displacement, which plays a major role in causing both human and financial losses. Dehloran, located in the southern part of Ilam Province, is a region that is frequently affected by both small and large earthquakes. In this study, 10 Sentinel-1A radar images, both before and after earthquakes, were used to analyze the subsidence and uplift in cities, dams, and surrounding areas. To validate the results of ground displacement, pixel coherence evaluation was conducted, which indicated high accuracy in interferometric measurements. The results showed that the northern regions of Dehloran experienced subsidence, while the southern areas experienced uplift. Displacements from earthquakes with magnitudes above 4 on the Richter scale in the region were recorded as centimeter-scale displacements. This study shows that even small earthquakes can cause significant damage in this area. The findings of this research can be useful for identifying high-risk and low-risk areas to reduce damages in urban development, dam construction, and oil and gas projects.

*Corresponding author: Dr. Iman Rousta E-mail address: irousta@yazd.ac.ir

How to cite this article: Kal Mishi, Z., Rousta, I., & Zandi, R. (2025). Investigating the Ground Displacement Caused by Earthquakes Using Radar Interferometry: A Case Study of Ilam Province and the Mountain Front Fault. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(2), 287-307. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.85880.1443

©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

Ground displacement caused by natural factors such as earthquakes and anthropogenic factors like subsidence can lead to significant changes in the landscape and the occurrence of natural disasters. Dehloran, due to its oil resources and improper construction practices, is one of the most vulnerable regions to earthquakes. With the advancement of remote sensing technologies, methods like Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) have become precise tools for monitoring such changes and evaluating the extent of ground displacement. Compared to traditional methods like geodetic surveys, these technologies are faster, more cost-effective, and more accurate, allowing for large-scale monitoring of natural hazards.

Study Area

Dehloran County, located in Ilam Province in southwest Iran, is a seismic region rich in oil and gas reserves. It is the second most populous county in Ilam Province and lies 130 km from the provincial capital. Dehloran spans from 46.31°E to 48.2°E longitude and from 32.3°N to 33.19°N latitude. It is bordered by Abdanan County to the north, Iraq to the south, Khuzestan Province to the east, and Mehran County to the west. The region is also intersected by active faults, including the Mountain Front Fault, which is the primary seismic source in the area.

Results and Discussion

In this study, to estimate ground displacement in Dehloran County, 10 Sentinel-1A images were analyzed using SNAP and ArcGIS software in combination with radar interferometry (InSAR) techniques. The results of data processing showed that the northern parts of Dehloran County experienced the most significant subsidence, while the plains and southern areas showed signs of uplift.

Displacement maps from 2015, 2019, and 2020 revealed notable land surface elevation changes. In 2015, the most significant subsidence was observed in the northern parts of the county, likely caused by fault activity and seismic events. In 2019 and 2020, displacement levels initially decreased; however, in 2020, a sharp increase in displacement was recorded, again likely due to new earthquakes and reactivation of faults. An analysis of soil types overlaid on displacement maps revealed that clay and limestone soils exhibited displacements ranging from +7 to -3 cm, while badlands showed displacements between +3 and +2 cm. These findings indicate serious implications for infrastructure and water resources, particularly in urban and rural areas located near active faults.

Conclusion

This research demonstrates that radar interferometry (InSAR) is an effective and reliable tool for estimating ground displacement caused by low-magnitude earthquakes in Dehloran County. This study is the first to investigate displacements resulting from earthquakes below magnitude 5 on the Richter scale in the region. The findings indicate that small earthquakes, despite their low magnitude, can have cumulative and significant impacts on urban infrastructure, oil and gas fields, and rural communities.

Displacements in areas such as Pahleh City and around active faults between 2015 and 2020 ranged from +7 cm to -10 cm, highlighting the vulnerability of the region's infrastructure to seismic activity. Furthermore, the repeated occurrence of small earthquakes in various locations suggests a potential for larger seismic events and ongoing ground deformation in the future.

These displacements, particularly in sensitive zones such as oil and gas fields, carry serious risks. Therefore, continuous monitoring and reinforcement of infrastructure are essential to mitigate potential damage, especially given the ongoing threats from subsidence and active ground deformation.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۳۰۷-۲۸۷

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2025.85880.1443 دسترسی آزاد

بررسی میزان جابجایی سطح زمین ناشی از زمین‌لرزه با استفاده از تداخل‌سنجی راداری: مطالعه موردی استان ایلام و گسل پیشانی کوهستان

زهرا کل میشی[۱]، ایمان روستا[2*]، رحمان زندی[3]

[۲،۱] گروه جغرافیا، دانشکده جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

[۳] گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

کلمات کلیدی:

رادار با دهانه ترکیبی (SAR)

تغییرشکل زمین ناشی از زلزله

گسل‌های فعال

سنتینل-۱

دهلران

چکیده

یکی از مهمترین اثرات زمین‌لرزه‌ها، جابجایی سطح زمین است که نقش عمده‌ای در ایجاد خسارات جانی و مالی ایفا می‌کند. شهرستان دهلران در بخش جنوبی استان ایلام یکی از مناطقی است که همواره تحت تأثیر زمین‌لرزه‌های کوچک و بزرگ قرار دارد. در این راستا، ۱۰ تصویر راداری ماهواره Sentinel-1A قبل و بعد از زمین‌لرزه‌ها برای تحلیل میزان پایین‌رفتگی و بالاآمدگی در شهرها، سدها و مناطق اطراف استفاده شد. برای اعتبارسنجی نتایج جابجایی سطح زمین، ارزیابی همدوسی پیکسل‌ها انجام شد که نشان‌دهنده دقت بالا در اندازه‌گیری‌های تداخل‌سنجی بود. نتایج نشان داد که نواحی شمالی شهرستان دهلران دچار پایین‌رفتگی شده و نواحی جنوبی بیشتر دچار بالاآمدگی گردیده‌اند. جابجایی‌های ناشی از زمین‌لرزه‌های با بزرگای بالای ۴ ریشتر در منطقه به‌صورت جابجایی‌های سانتی‌متری ثبت گردید. این مطالعه نشان می‌دهد که حتی زمین‌لرزه‌های کوچک می‌توانند آسیب‌های جبران‌ناپذیری در این منطقه ایجاد کنند. یافته‌های این تحقیق می‌تواند برای شناسایی مناطق پرخطر و کم‌خطر به‌منظور کاهش خسارات در پروژه‌های شهرسازی، سدسازی و نفت و گاز مفید واقع گردد.

*نویسنده مسئول: دکتر ایمان روستا

Email: irousta@yazd.ac.ir

مقدمه

جابجایی سطح پوسته زمین ناشی از عوامل طبیعی (زمین‌لرزه) و عوامل غیرطبیعی (فرونشست ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی، نفت، معدن) است. این جابجایی‌های طبیعی یا انسان‌ساخت، شکل زمین را تغییر داده و موجب بلایای طبیعی و خسارات می‌شود (Zare Kamali, Al-Husseini Al-Madrassi & Naghdi, 2017). با بررسی درست این موضوع و ارائه مدلهای می توان به مدیران در این زمینه برای مدیریت مخاطراتی همچون زمین لرزه کمک کرد (Maghsoudi & Mahdavi, 2016). شهرستان دهلران یکی از مناطق نفت خیز ایران است و سدهای بزرگ در آن احداث شده است و دارای شهر و روستاهای با بافت سنتی و ساخت سازه‌های غیر اصولی است و از این رو این مطالعه شهرستان دهلران دارای اهمیت است و وقوع زمین‌لرزه می‌تواند باعث آسیب‌های جبران ناپذیری شود (Basareh, Joudeki, Farzipoursain & Safaei, 2013). امروزه با گسترش فناوری‌های نوین با روش‌های مختلف می‌توان به پایش تغییرات سطح پوسته زمین پرداخت. فناوری «سنجش از دور» به خصوص با استفاده از داده‌های رادار، یکی از ابزارهایی است که می‌تواند جابجایی پوسته را در بلایای طبیعی مانند زلزله بررسی کند و نشان دهد که تا چه اندازه سطح پوسته زمین جابجا شده است (Joyce, Wright, Samsonov & Ambrosia, 2009). ذکر این نکته ضروری است که در گذشته این امر با روش‌های ژئودتیکی انجام می‌شد که از معایب آن صرف زمان طولانی برای اندازه‌گیری بود؛ اما فناوری سنجش از دور راداری، سطح وسیع‌تری از زمین را پوشش می‌دهد و هزینه و زمان کمتری نسبت به روش‌های زمینی می‌برد. با گسترش فناوری سنجش از دور راداری، از تصاویر SAR[1] برای تولید محصولات گوناگون استفاده شد (Sansosti, Casu, Manzo & Lanari, 2010). یکی از این روش‌ها، تکنیک «تداخل‌سنجی رادار دریچه مصنوعی» (InSAR[2]) است که از اختلاف فاز بین زوج تصویر راداری اطلاعاتی مانند جابجایی و یا ارتفاع را استخراج می‌کند (Ho Tong Minh, Hanssen & Rocca, 2020) و بنابراین تغییر شکل یا میزان جابجایی پوسته زمین برآورد می‌شود (Auriac et al., 2013).

در زمینه تداخل‌سنجی راداری در سطح جهان و ایران پژوهش‌های صورت گرفته است به آن می‌پردازیم. زارع کمالی و همکاران (Zare Kamali et al., 2017) به مطالعه‌ی میزان جابجایی عمودی زمین پرداخته‌اند. در این پژوهش میزان جابه‌جایی عمودی سطح زمین در اراضی تهران با استفاده از تحلیل سری زمانی بر مبنای الگوریتم طول خط مبنای مکانی کوتاه (SBAS[3]) و تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی رادار با روزنه مصنوعی (DINSAR[4]) مورد مطالعه قرار گرفته است که در این پژوهش برای این منظور از ۱۹ تصویر باند C سنجنده ASAR و ۱۱ تصویر باند X سنجنده (TERRA SAR) استفاده شد. بررسی نتایج دو سنجنده نشان داد که میزان نشست برای سنجنده ASAR به طور میانگین ۰/۷۶۱ میلی‌متر در روز و برای سنجنده TERRA SAR به طور میانگین ۰/۷۷۷ میلی‌متر در روز است. همچنین نتایج نشان داد که برخی نقاط بالاآمدگی داشته‌اند که میزان بالاآمدگی برای سنجنده ASAR به طور میانگین ۰/۵۲۹ میلی‌متر در روز و برای سنجنده TERRA SAR به طور میانگین ۰/۴۷۶ میلی‌متر در روز است. و نتایج نشان داد که مناطق نشست و بالاآمدگی برای هر دو سنجنده نزدیک به هم است. عبدالملکی و همکاران (Abdulmaleki, Maleki & Khazaei, 2021) به مطالعه جابجایی ارتفاعی زمین و تحلیل اثرات ژئومورفولوژیکی با استفاده از داده‌های دورسنجی پرداختن که از دو تصویر ماهواره Sentinel-1 به منظور بررسی میزان تغییرات جابجایی منطقه سرپل ذهاب استفاده کردند و این نتیجه به دست آمد که تکنیک تداخل‌سنجی راداری، ابزاری کارآمد برای محاسبه میزان جابجایی زمین است. آتزوری و همکاران (Atzori, Manunta, Fornaro, Ganas & Salvi, 2008) به مطالعه جابجایی زلزله آتن، با استفاده از تداخل‌سنجی چندزمانه تفاضلی پرداختند. در این مطالعه از صد تصویر برای برآورد جابجایی زمین در سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۲ استفاده گردید و دیده شد که تحلیل چندزمانه تفاضلی، روشی مناسب برای مطالعه شکستگی‌های بزرگ ناشی از زلزله است و داده‌های ماهواره Sentinel-1 با موفقیت تغییر شکل سطح را

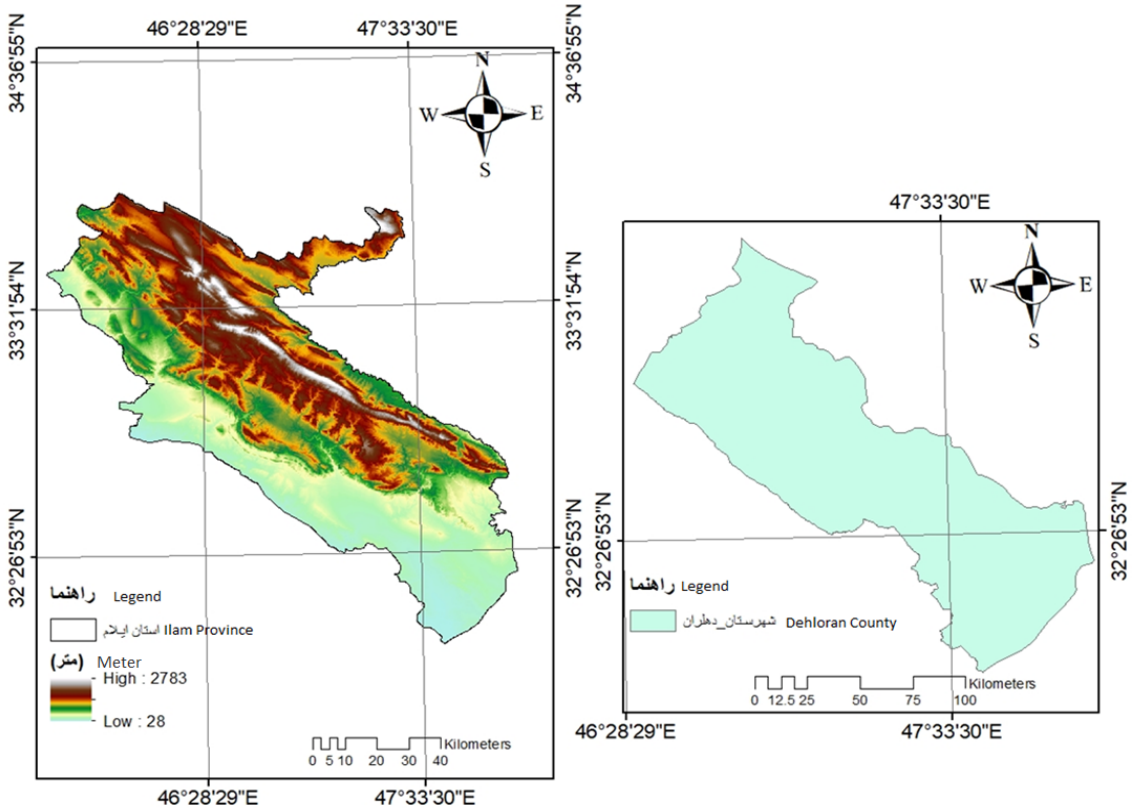
1 -Synthetic Aperture Radar
2 -Interferometric Synthetic Aperture Radar
3- Small Baseline Subset
4-Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar

برای بازه‌ای۱۲روزه برآورد کرده است. ساری‌چیخینا و همکاران (Sarychikhna et al., 2009) به بررسی جابجایی سطح و تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در زلزله ۵/۴ در سال ۲۰۰۶ در گسل مورلیا در کالیفرنیا پرداختند. آنها از تصاویر ماهواره Envisat و روش تداخل‌سنجی راداری برای شناسایی جابجایی استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که اختلاف بین مدل و داده‌های ترازیابی شده عمدتاً بین ۶-۰ سانتی‌متر است. دلونگ و همکاران (Delong et al., 2016) تغییر شکل سطح زمین در زلزله ۶ در ناپا ۲۰۱۴ را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از تصاویر راداری بالگرد و پهپاد استفاده شد و نتایج نشان داد که تغییر شکل در امتداد گسل بوده و لغزش پس‌لرزه‌ای در گسل اصلی رخ داده است. شهرستان دهلران در یکی از مناطق مهمی است که دارای سد، میادین نفتی، میادین گازی، شهرها و روستاها است. سالانه زمین لرزه های بزرگ و کوچکی در شهرستان دهلران رخ می‌دهد و این دو موضوع باعث اهمیت شهرستان دهلران شده است و به همین علت مطالعه و پایش زمین لرزه‌های بزرگ و کوچک در شهرستان دهلران امری ضروری و مهم است. بنابراین مطالعه حاضر به برآورد میزان جابجایی سطح زمین ناشی از زمین لرزه‌های ۴/۶ریشتری ۲۳ اسفند سال ۱۳۹۸، ۴/۹ ریشتر سال ... و ۴/۳ ریشتری اسفند ۱۳۹۷ شهرستان دهلران با استفاده از روش تداخل سنجی راداری پرداخته است. این مطالعه گامی است در جهت به دست آوردن نقشه میزان جابجایی سطح زمین که در بروز حوادث دارای اهمیت می‌باشد. با استفاده از این اطلاعات می‌توان در مناطق شهری و روستایی تحت تاثیر زمین‌لرزه با انجام پیش‌بینی‌های لازم از ساخت ساز در پرخطر جلوگیری کرده و به هدایت ساخت سازها به سمت مناطقی که کمتر تحت تأثیر زمین‌لرزه قرار می‌گیرند، مبادرت کرد. همچنین با داشتن نقشه میزان جابجایی سطح زمین می‌توان میادینی که تحت تأثیر زمین‌لرزه قرار گرفته‌اند و میزان هدر رفت انرژی را برآورد کرد و از هدر رفتن بیشتر آن جلوگیری کرد و همچنین با اندازه‌گیری میزان جابجایی بدنه سدها می‌توان از آسیب به بدنه سدها و خسارات احتمالی جلوگیری کرد.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان دهلران در استان ایلام از مناطق نفت‌خیز کشور محسوب می‌شود. دهلران دومین شهرستان استان از لحاظ جمعیت است. مساحت این شهرستان، ۶۷۸۵ کیلومتر مربع و ارتفاع آن از سطح دریا ۲۱۶ متر می‌باشد. شهرستان دهلران در طول جغرافیایی ۴۶.۳۱.۱۹غربی تا ۴۸.۲.۲۹ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲.۳.۱۱جنوبی تا ۳۳.۱۹.۱۴ شمالی قرار دارد. شهرستان دهلران در جنوب شرقی استان ایلام است و شهر دهلران ۱۳۰ کیلومتر با مرکز استان فاصله دارد. شهرستان دهلران از شمال به شهرستان آبدانان، از جنوب به کشور عراق، از شرق به استان خوزستان و از غرب به شهرستان مهران محدود می‌شود و همچنین موقعیت گسل در شکل ۲ بر روی تصاویر گوگل ارث برای سال ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ نشان داده شده است.

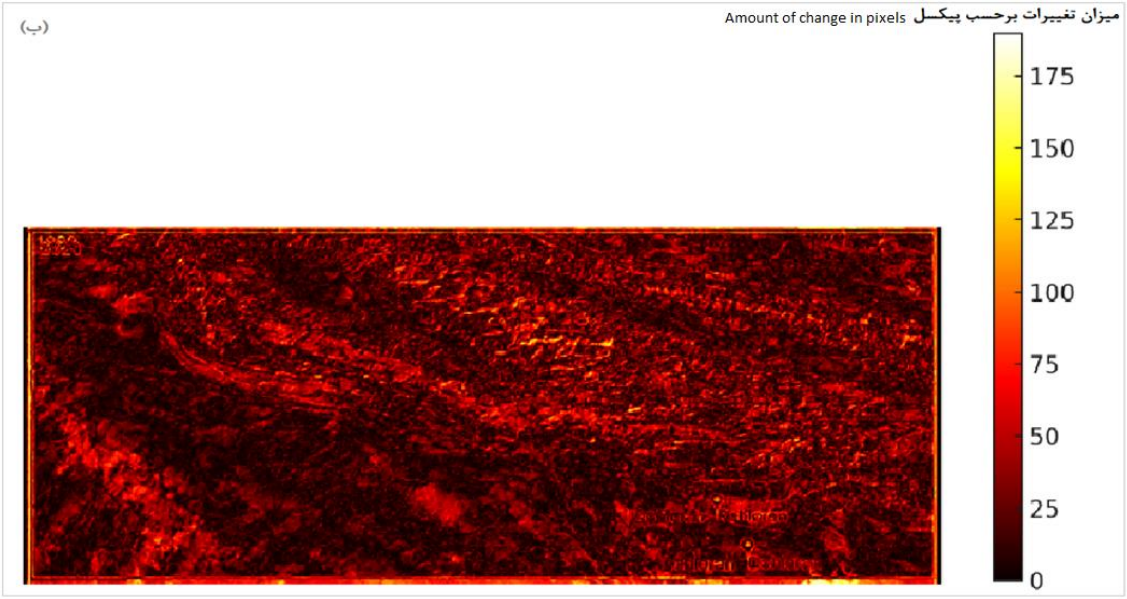


شکل ۱-نقشه استان ایلام (سمت چپ) و نقشه شهرستان دهلران (سمت راست)

Fig.1. Map of Ilam Province (left) and map of Dehloran County (right)

در شکل ۲ نقشه تغییرات بین سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ در دهلران را مشاهده می‌کنید. در این تصویر، نواحی روشن‌تر نشان‌دهنده تغییرات بیشتری هستند. به نظر می‌رسد که برخی مناطق در طول این دوره تغییرات قابل توجهی داشته‌اند، که ممکن است ناشی از فعالیت‌های زمین‌شناسی مانند جابجایی گسل باشد. مقدار تغییرات در این نقشه به واحد شدت تغییرات پیکسلی در تصاویر است (بر اساس مقدار روشنایی در تصاویر ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰). این مقدار مستقیماً با تغییرات سطح زمین مرتبط است، در شکل ۲ تغییرات نشان داده شده است و نقاطی که در طول زمان دچار تغییرات شده است به رنگ زرد نشان داده شده است.





شکل ۲- الف) موقعیت گسل پیشانی کوهستان شهرستان دهلران بر روی تصاویر گوگول ارث برای سال ۲۰۲۰ و ۱۹۹۰ ب) میزان تغییرات بین سال ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ در گسل پیشانی کوهستان در شهرستان دهلران

Fig. 2. A) Location of the mountain foreland fault in Dehloran County on Google Earth images for 2020 and 1990 B) Amount of changes between 1990 to 2020 in the mountain foreland fault in Dehloran County

جدول ۱- بررسی تغییرات ارتفاع با استفاده از مدل رقومی ارتفاع برای گسل پیشانی کوهستان سال ۲۰۱۵ نسبت به سال ۲۰۲۰

Table 1- Examination of elevation changes using the digital elevation model for the Kohistan foreland fault in 2015 compared to 2020

نقاط Points	ارتفاع نقاط سال ۲۰۱۵ Height of points in 2015	ارتفاع نقاط سال ۲۰۲۰ Height of points in 2020	تفاضل نقاط سال ۲۰۱۵ و۲۰۲۰ Difference between points in 2015 and 2020
1	1036.493	1036.541	1
2	1046.286	1036.815	4.4
3	669.0253	668.223	0.8
4	411.2166	412.7835	1.5
5	738.6406	740.9424	2.3

در جدول شماره ۱ با استفاده از مدل رقومی ارتفاع برای سال ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ نسبت اختلاف ارتفاع محاسبه شد و نشان‌دهنده تغییرات زیاد هست نقاط ۱، ۴ ، ۵ افزایش ارتفاع داشته و نقاط ۲ و ۳ کاهش ارتفاع داشته است.

تغییرات ارتفاعی با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) برای سال ۲۰۱۵-۲۰۲۰ و تغییرات پیکسل‌ها در تصاویر گوگل ارث برای سال ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ نشان دهنده فرایندهای طبیعی مانند فرسایش، رسوب‌گذاری، جابجایی‌های زمین شناسی و تأثیرات انسانی مانند ساخت سازه یا استخراج معدن است که نشان دهنده جابجایی‌های در سطح زمین است و به همین علت با استفاده از تصاویری راداری سار به بررسی میزان تغییرات ناشی زمین لرزه پرداخته شده است.

دریافت داده‌ها

تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR) یکی از ابزارهای جدید برای برآورد میزان جابجایی سطح زمین و تغییرات سطح زمین است (Burgmann, Rosen & Fielding, 2000). در این پژوهش از۸ تصویر ماهواره Sentinel-1A، مربوط به قبل و بعد از زمین‌لرزه‌ای خفیف از وب کپرنیک (scihub. Copernicus. Eu) اخذ شد، مشخصات تصاویر در جدول ۱ نمایش داده شده است. پیش پردازش‌ها تصاویر نیز در نرم افزارSNAP، نقشه نهایی در Arc GIS انجام شد.

جدول۲- داده‌های ماهواره‌ای مورده استفاده برای محاسبه جابجایی سطح زمین درگسل پیشانی کوهستان، شهرستان دهلران

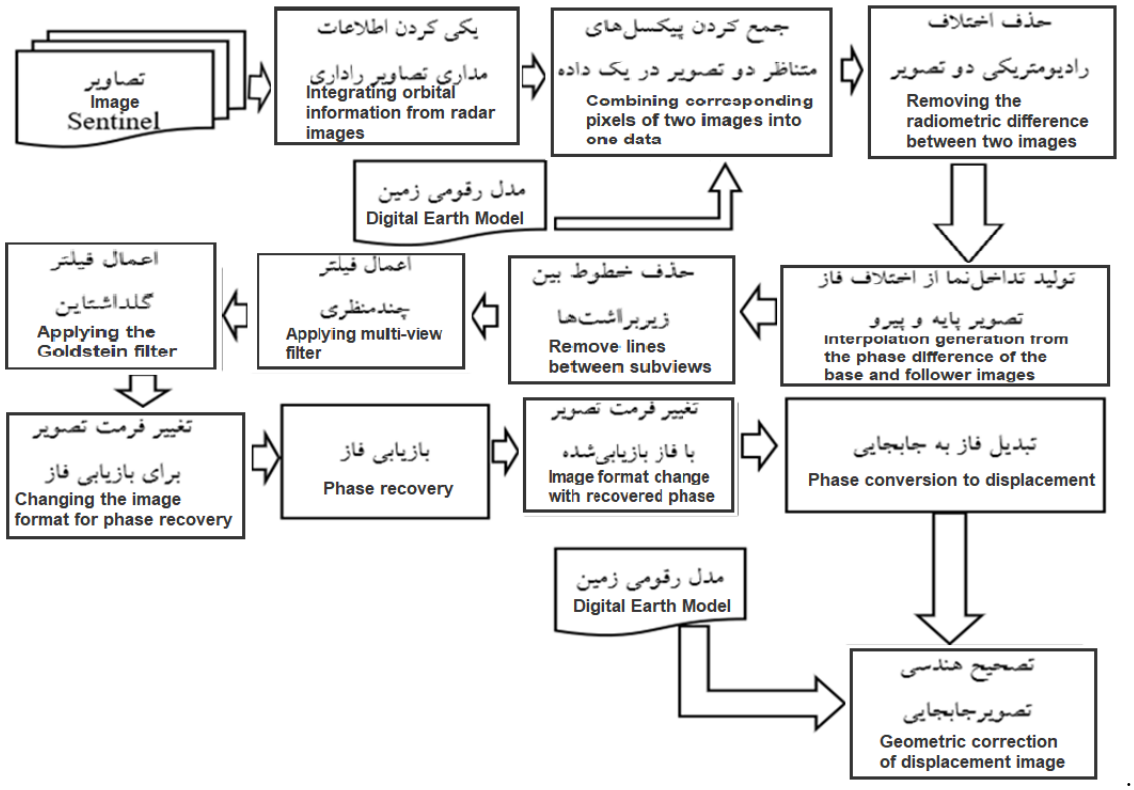
Table 2- Satellite data used to calculate ground surface displacement on the Kohistan foreland fault, Dehloran County

شماره Number	تاریخ تصاویر Date	فرمت تصاویر Image Format	حالت تصویر برداری Imaging Mode	گذر تصویر برداری Imaging Pass
1	2015/02/14	SLC	IW	نزولی (Descending)
2	2015/03/10	SLC	IW	نزولی (Descending)
3	2015/02/03	SLC	IW	نزولی (Descending)
4	2015/03/11	SLC	IW	نزولی (Descending)
5	2019/02/17	SLC	IW	نزولی (Descending)
6	2019/03/01	SLC	IW	نزولی (Descending)
7	2020/02/24	SLC	IW	نزولی (Descending)
8	2020/03/19	SLC	IW	نزولی (Descending)

فرمت این تصاویر، مختلط تک‌نگاه (SLC)[1] با حالت تصویربرداری برداشت پهن برای تداخل‌سنجی (IW)[2] و مدار همه تصاویر نزولی است. تصاویر راداری این ماهواره دارای قدرت تفکیک مکانی بالایی است و برای به دست آوردن نقشه جابجایی سطح زمین با قدرت تفکیک مکانی بالا مناسب می‌باشد (Hanssen, 2005).

روش انجام پژوهش

در این پژوهش، تداخل‌سنج‌ها طی مراحل شکل ۳ با نرم‌افزار SNAP انجام شد و نتایج نهایی پس از صحت‌سنجی با نرم‌افزار ArcGIS به شکل نقشه درآمد.



شکل ۳- مراحل اجرای تحقیق

Fig.3. Research implementation steps

تولید تداخل‌نما یکی از مهمترین بخش‌های پردازش تصاویر راداری است. از حاصل‌ضرب تصویر راداری اول در مختلط مزدوج تصویر دوم، تداخل‌نما به دست می‌آید (Massonnet & Feigl, 1998). فاز تداخل‌نما، اختلاف فاز زوج تصویر راداری و دامنه تداخل‌نما حاصل‌ضرب دامنه‌های آن دو تصویر است.

پس از محاسبه تداخل‌نما، فاز زمین مسطح و همچنین فاز ناشی از توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی SRTM حذف گردید. در تداخل‌سنجی، علاوه بر تداخل‌نما، تصویر کوهرنسی نیز به دست می‌آید. تصویر کوهرنسی نشان‌دهنده میزان تطابق

1- Single Look Complex

2- Interferometric Wide

سیگنال‌های تداخل‌سنجی است و ارزش هر پیکسل آن عددی بین صفر تا یک است که هر چه قدر به یک نزدیک‌تر باشد، محاسبات از دقت بالاتری برخوردار است (Shami, Mashhadi Hosseinali & Babaei, 2019). مقادیر بالاتر از ۰/۶ نشان‌دهنده همدوسی بالا و دقتی مطلوب است.

تصاویر راداری از پیکسل‌هایی با درجات خاکستری تشکیل شده است. در اثر تداخل سازنده و مخرب در امواج بازپراکنش شده، در پیکسل‌های این تصاویر نویز ایجاد می‌شود. نویز در تصاویر راداری، نویز اسپکل[1] است و شبیه لکه‌هایی با بافت دانه‌دانه است و باعث کاهش کیفیت تصویر می‌شود. این لکه‌ها را به طور کامل نمی‌توان حذف کرد ولی می‌توان آنها را کاهش داد. برای کاهش این لکه‌ها، انواع فیلترها اعمال می‌شود (Maghsoudi & Mahdavi, 2016).

عوامل زیادی همچون خط مبنای مکانی، خط مبنای زمانی، پوشش گیاهی و خطای مدار در ایجاد نویز در تداخل‌نما نقش دارند. نویزها باعث کاهش کیفیت تصویر می‌شوند. برای بهبود کیفیت تصویر، در ابتدا فیلتر چندمنظری[2] اعمال شد که برای نویزهای ناشی از خط مبنای زمانی، خط مبنای مکانی و پوشش گیاهی موثر است و با میانگین‌گیری از پیکسل‌های مجاور محاسبه می‌شود. برای کاهش بیشتر نویز از فیلتر گلدشتاین[3] استفاده شد. این فیلتر، نواحی با فازهای با انسجام ضعیف و انسجام به شدت بالا را حذف کرده و دید حاشیه را افزایش می‌دهد. این فیلتر از تبدیل فوریه سریع (FFT)[4] برای افزایش نسبت سیگنال به نویز استفاده می‌کند (Baran, Stewart, Kampes, Perski & Lilly, 2003).

در ادامه، برای تبدیل مقادیر فاز در تداخل‌نما به مقادیری که نشان‌دهنده جابجایی پوسته زمین است، بازیابی فاز[5] انجام می‌شود. مقادیر اختلاف فاز در تداخل‌نما، عددی بین ۰ تا 2π است و مقادیر بیشتر، گسسته می‌شود. با عمل بازیابی فاز، ابهام فاز از بین می‌رود و ارزش پیکسل‌ها به مقدایر واقعی و پیوسته تبدیل می‌شود (Mehrabi & Pourkhosravani, 2018). تصویر به دست آمده است، بالا آمدگی و پایین رفتگی زمین را با واحد فاز نشان می‌دهد. در پایان، مقادیر پیوسته اختلاف فاز میان دو تصویر قبل و بعد زمین‌لرزه، به جابجایی در جهت دید ماهواره با واحد طول تبدیل می‌شود.

برای ارزیابی دقت پیکسل‌های جابجایی، از میزان همدوسی[6] تصویر استفاده شد. تصویر همدوسی، میزان تطابق سیگنال‌های تداخل‌سنجی را نشان می‌دهد. مقدار پیکسل‌های همدوسی عددی بین ۰ و ۱ است و هر چه این مقدار بیشتر باشد، دقت کار بالاتر است. عمده پیکسل‌ها دارای همدوسی ۰/۶ به بالا است که دقت کلی خوبی را نشان می‌دهد.

یافته‌های تحقیق

مطالعات آماری زلزله‌ها در منطقه مورد مطالعه

برای مطالعه منطقه مورد نظر، یک دوره زمانی ۳۰ ساله از ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ در نظر گرفته شد. زلزله‌ها معمولاً تا شعاع ۱۰۰ کیلومتری خود را تحت تاثیر قرار می‌دهند؛ بنابراین دایره‌ای با مرکزیت رومرکز زلزله دهلران و شعاع ۱۰۰ کیلومتر رسم شد و تمام زمین‌لرزه‌های آن بررسی گردید. نتایج نشان داد در این بازه، تعداد ۷۱۰ زلزله رخ داده است. اولین زلزله با بزرگای ۴/۴ و عمق ۳۳ کیلومتر در تاریخ ۱۹۹۰/۱/۱ و آخرین زلزله با بزرگای ۴/۲ و عمق ۱۰ کیلومتر در تاریخ ۲۰۲۰/۱۱/۲ رخ داده است. همچنین بزرگ‌ترین زلزله، بزرگای ۶/۲ و کوچکترین آنها، بزرگای ۳/۲ داشته است و بیشترین عمق زلزله، ۱۰۰/۴ و کمترین آن ۰/۹ کیلومتر بوده است. بیشترین زمین‌لرزه‌ها در بزرگای بین ۴ تا ۵ می‌باشند. بیشترین تراکم زلزله‌ها در محدوده جغرافیایی در طول جغرافیایی ۴۷ تا ۴۸ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ تا ۳۳ شمالی قرار دارد. آمار فراوانی زلزله‌ها در جدول ۳ آمده است.

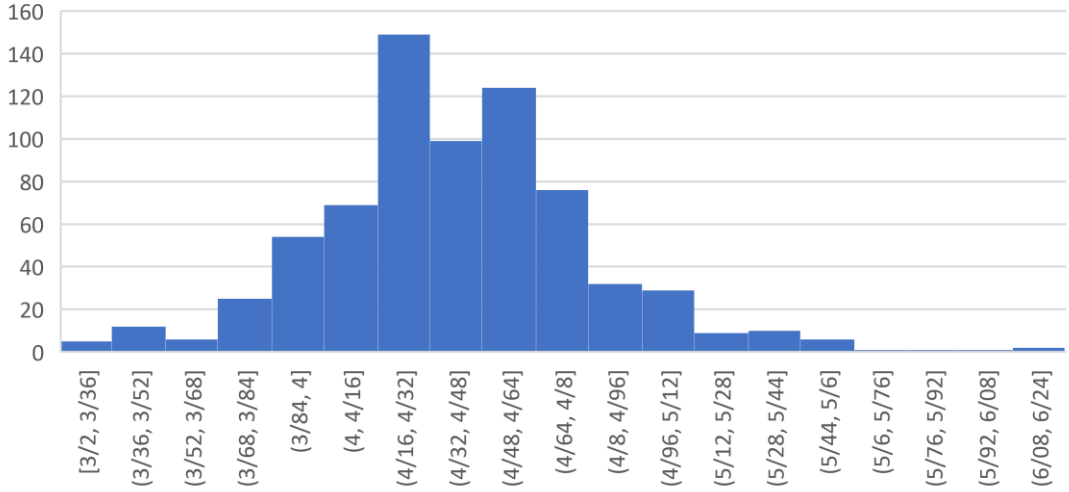
1- Spackle noise
2- Muitilooking filter
3- Goldstein filter
4- Fast Fourier Transform
5- Unwrapping
6-Coherence

جدول ۳-فراوانی زمین‌لرزه در شهرستان دهلران در طی ۳۰ سال گذشته تا شعاع ۱۰۰ کیلومتر

Table 3- Earthquake frequency in Dehloran County over the past 30 years within a radius of 100 km

بزرگای زلزله (**Earthquake magnitude**)	3-4	4-5	5-6	6-7
تعداد (**Number**)	59	592	56	3

برای فهرست زلزله‌های مورد مطالعه، نمودار فراوانی بر اساس بزرگا تهیه گردید (شکل۴). بیشترین فراوانی مربوط به زلزله‌های با بزرگای بین ۴ تا ۵ است که زمین‌لرزه‌های خفیف شناخته می‌شوند.

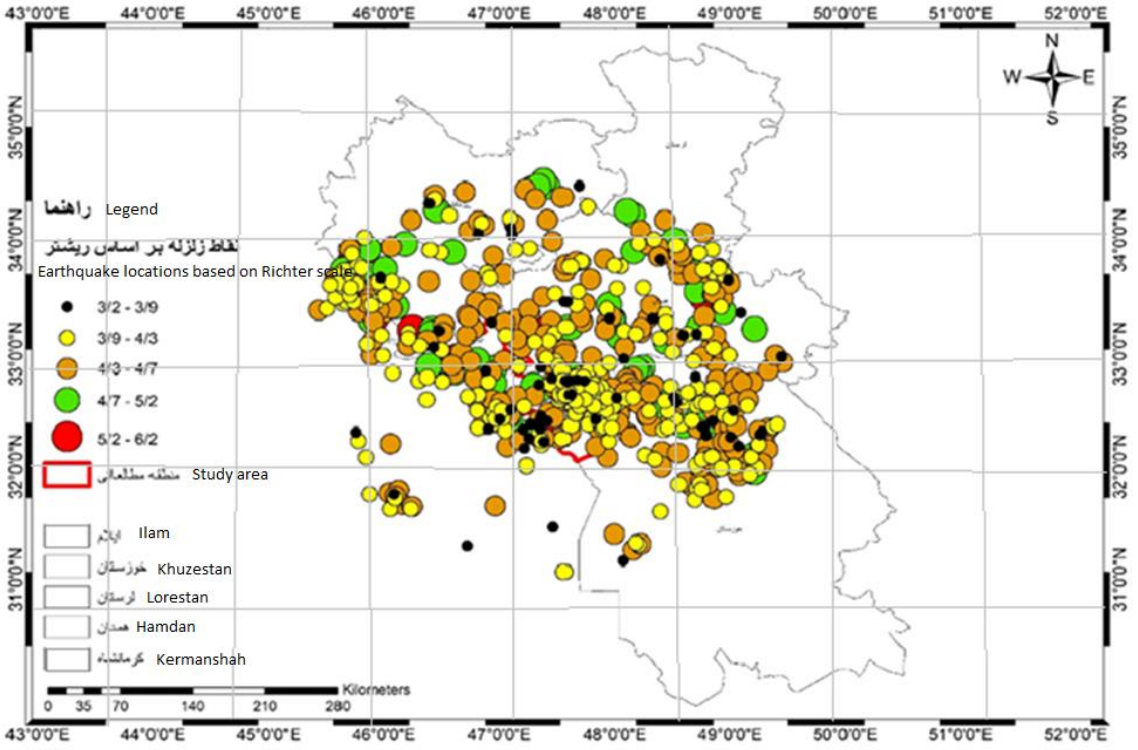


شکل ۴- نمودار فراوانی زلزله‌ها در شهرستان دهلران بر اساس بزرگا در بین سالهای ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ تا شعاع ۱۰۰ کیلومتر

Fig.4. Earthquake frequency chart in Dehloran County based on magnitude between 1990 and 2020 up to a radius of 100 km

شکل ۵، نقشه پراکنش رومرکز زلزله‌ها بر اساس بزرگا را نشان می‌دهد. در این نقشه، زلزله‌ها بر حسب بزرگا به پنج دسته تقسیم شده‌اند: دسته اول ۳/۹-۳/۲ که بیشتر در جنوب نقشه تمرکز دارند و هر چه به سمت شمال حرکت کنیم از تعداد آنها کاسته می‌شود. از طرفی این زمین‌لرزه‌ها در قسمت غربی بیشتر از جنوب منطقه است و در جنوب استان ایلام از تراکم بیشتر و در شمال استان خوزستان از تراکم کمتری برخوردارند و در دیگر استان‌ها تعداد ناچیزی دارند. دسته دوم ۴/۳-۳/۹ که در شمال منطقه تراکم کمتری داشته و در غرب بیشتر رخ داده است و با حرکت به سمت شرق، از تعداد آنها کاسته می‌شود. این زمین‌لرزه‌ها در جنوب استان ایلام دارای تراکم بیشتری نسبت به شمال آن است و در استان خوزستان دارای تراکمی بیشتر و در استان همدان دارای پراکندگی بیشتری است.

دسته سوم ۴/۷-۴/۳ که دارای بیشترین تعداد زمین‌لرزه‌ها در استان‌های ایلام و خوزستان است. هر چه به طرف جنوب و غرب منطقه حرکت می‌کنیم بر تعداد این زمین‌لرزه‌ها افزوده و هر چه به سمت شرق می‌رویم پراکنده‌تر می‌شوند. با حرکت به سمت شمال منطقه، از تعداد این زمین‌لرزه‌ها کاسته می‌شود. دسته چهارم ۴/۷-۵/۲ که با تعداد کم در استان‌های ایلام و خوزستان بیشتر رخ داده است. هر چه از مرکز منطقه به سمت جنوب و شرق حرکت می‌کنیم تعداد آنها بیشتر و هر چه از مرکز به سمت شمال منطقه برویم تعداد آنها کاهش می‌یابد. دسته پنجم ۵/۲-۶/۲ که با تعداد بسیار کم در غرب منطقه بیشتر رخ داده است. می‌دانیم که زلزله‌های با بزرگای بیشتر، کمتر رخ می‌دهند. در این منطقه، بیشترین تعداد زلزله‌ها در استان ایلام و در جنوب آن رخ داده است.

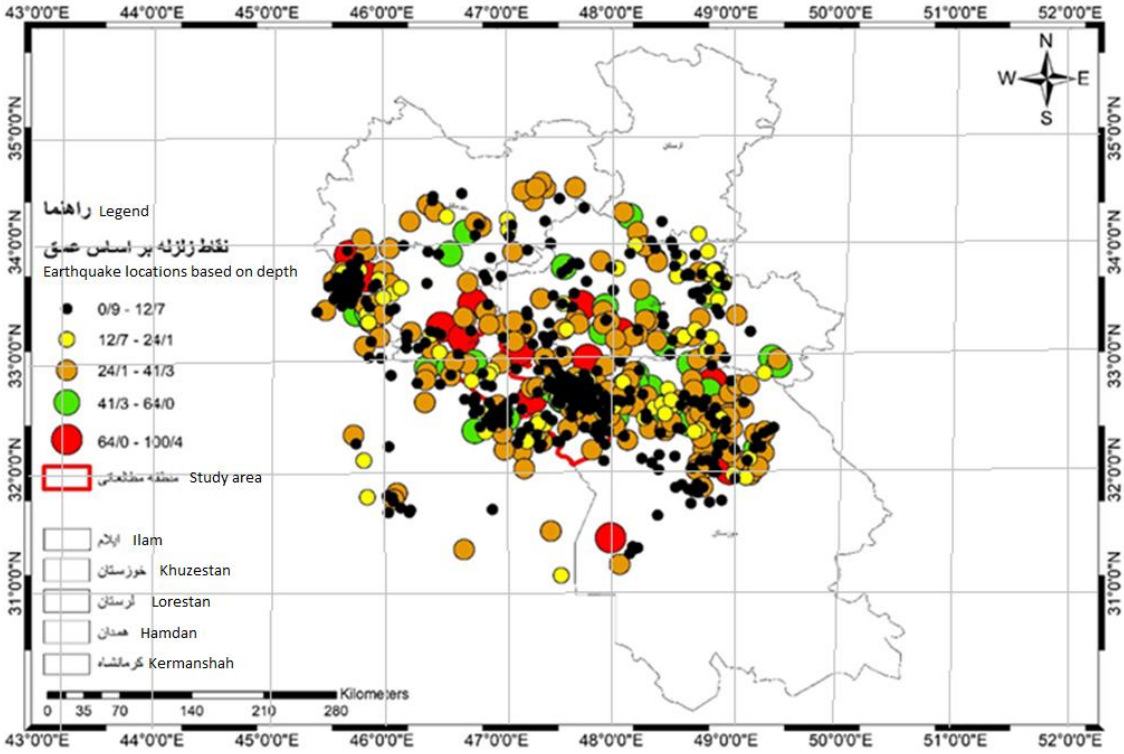


شکل ۵- نقشه پراکنش زمین لرزه ها در شهرستان دهلران بر اساس ریشتر در بین سالهای ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ تا شعاع ۱۰۰ کیلومتر

Fig.5. Earthquake distribution map in Dehloran County based on Richter between 1990 and 2020 up to a radius of 100 km

شکل ۶، پراکنش زمین‌لرزه‌ها بر اساس عمق را نشان می‌دهد. در این نقشه، زمین‌لرزه‌ها بر اساس عمق (km) به پنج دسته تقسیم شده‌اند: دسته اول ۱۲/۷-۰/۹ که بیشترین فراوانی را دارد و در جنوب استان ایلام بیشتر از شمال آن رخ داده است. در شرق منطقه، این زمین‌لرزه‌ها به صورت پراکنده رخ داده‌اند. دسته دوم ۲۴/۱-۱۲/۷ که بیشترین تمرکز آنها در استان خوزستان است. هر چه از جنوب منطقه به سمت شمال و از مرکز به سمت شرق و غرب حرکت کنیم، از تعداد آنها کاسته می‌شود. دسته سوم ۴۱/۳-۲۴/۱ که بیشترین تعداد آنها به ترتیب در استان‌های خوزستان، ایلام و همدان رخ داده است. تمرکز این زلزله‌ها در جنوب منطقه بیشتر از شمال آن است و در شرق و غرب منطقه نیز به صورت پراکنده رخ داده‌اند.

دسته چهارم ۶۴-۴۱/۳ که فراوانی آنها کمتر از همه بوده و بیشترین رخداد آنها در استان ایلام و به صورت پراکنده است. هر چه از مرکز منطقه به سمت شرق برویم بر تعداد آنها به صورت پراکنده افزوده می‌شود و هر چه به سمت شمال حرکت کنیم از تعداد آنها کاسته شده و به صفر می‌رسد. در جنوب منطقه نیز تعداد آنها بسیار اندک است. دسته پنجم ۱۰۰/۴ -۶۴ که تعدادشان بسیار اندک است. بیشتر این زمین‌لرزه‌ها در غرب منطقه و در استان ایلام رخ داده است و در شمال منطقه تعداد آنها به صفر می‌رسد. در جنوب و شرق منطقه نیز از تعداد آن کاسته می‌شود. در نتیجه، بیشترین زلزله‌ها در عمق‌های کم و در استان ایلام و در جنوب آن رخ داده است.



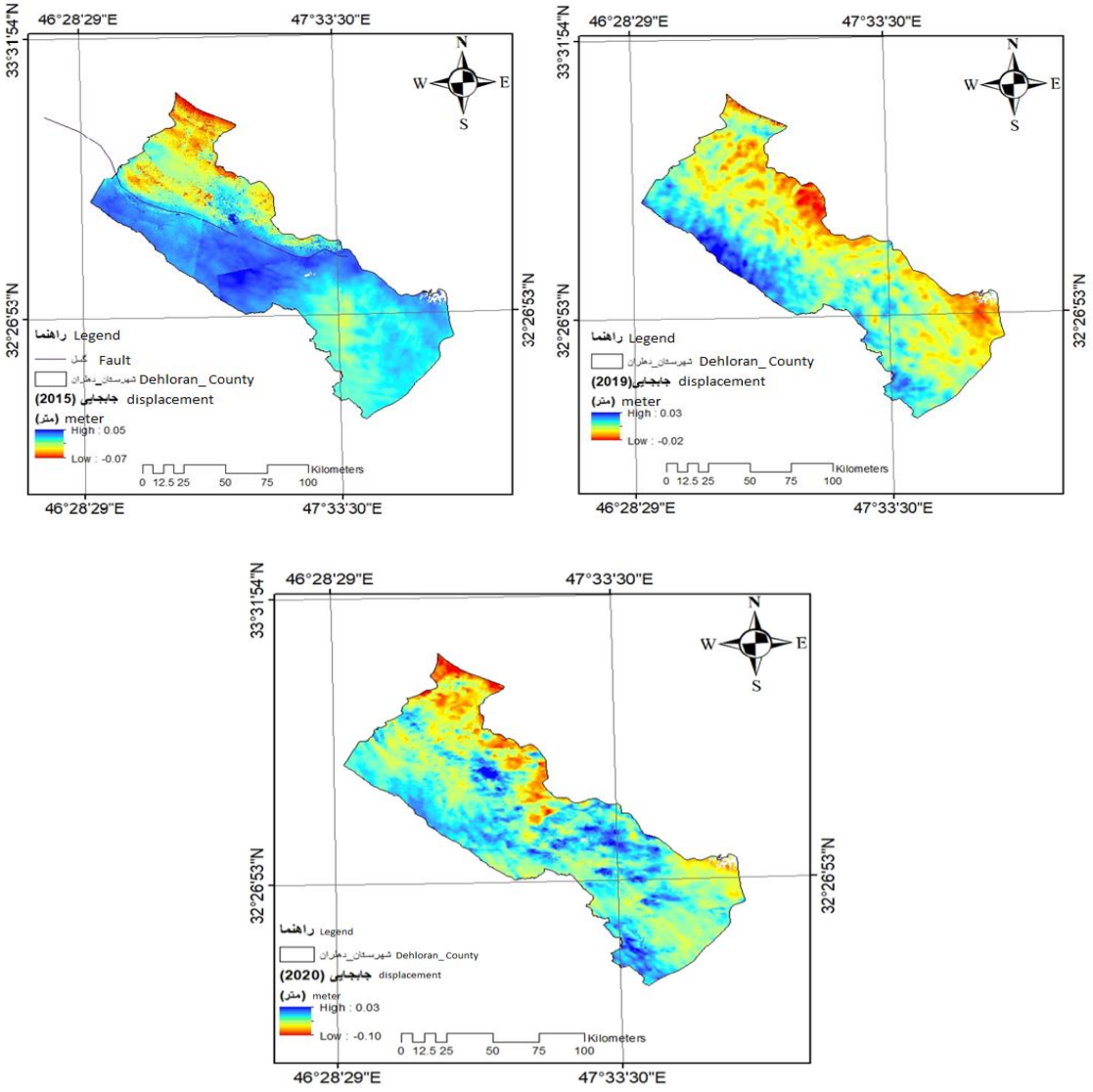
تصویر۶- نقشه پراکنش زمین‌لرزه‌ها در شهرستان دهلران بر اساس عمق (کیلومتر) بین سالهای ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ به شعاع ۲۰۰ کیلومتر

Fig.6. Earthquake distribution map in Dehloran County based on depth (km) between 1990 and 2020 with a radius of 200 kilometers

نتایج و بحث

برای برآورد میزان جابه‌جایی سطح زمین در منطقه مورد مطالعه از ۱۰ تصویر سنتینل ۱، نرم افزار SNAP, Arc-GIS و تکنیک تداخل سنجی راداری نقشه های جابجایی سطح زمین به دست آمد. شکل ۷ نقشه جابجایی نشان داده می‌دهد ارتفاعات در قسمت‌های شمالی نقشه دارای بیشترین میزان پایین رفتگی بوده که با رنگ قرمز مشخص شده است. دشت‌ها و قسمت پایین دست بیشتر دچار جابه‌جایی به صورت بالاآمدگی شده است و بیشترین بالاآمدگی مربوط به دشت‌ها در نواحی جنوبی است. با حرکات به سمت شمال نقشه نشان از تمرکز جابجایی بیشتر نسبت به جنوب نقشه را نشان می‌دهد.

در این مطالعه، در شکل ۷ جابجایی سطح زمین در شهرستان دهلران طی زمین‌لرزه‌های مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است. نقشه‌های ارائه‌شده تغییرات ارتفاعی سطح زمین را در سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ بر اساس پردازش داده‌های تداخل‌سنجی راداری نمایش می‌دهند. نقشه جابجایی سال۲۰۱۵: محدوده تغییرات ارتفاع: از ۰/۰۷- سانتی‌متر(پایین رفتگی) تا ۰/۰۵+ سانتی‌متر (بالاآمدگی). بیشترین میزان پایین‌رفتگی در بخش‌های شمال شهرستان دهلران مشاهده می‌شود، که احتمالاً مرتبط با حرکت گسل‌های فعال منطقه و جود اجرام با حجم بالا است در اثر زمین‌لرزه‌های محلی است. بیشترین میزان پایین رفتگی در بخش‌های شمالی و مرکزی دیده می‌شود که می‌تواند نتیجه‌ی فشارهای زمین‌ساختی ناشی از انتشار امواج لرزه‌ای باشد. دامنه تغییرات جابجایی نسبتاً گسترده بوده و نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه زمین‌لرزه بر تغییرات توپوگرافی منطقه است.

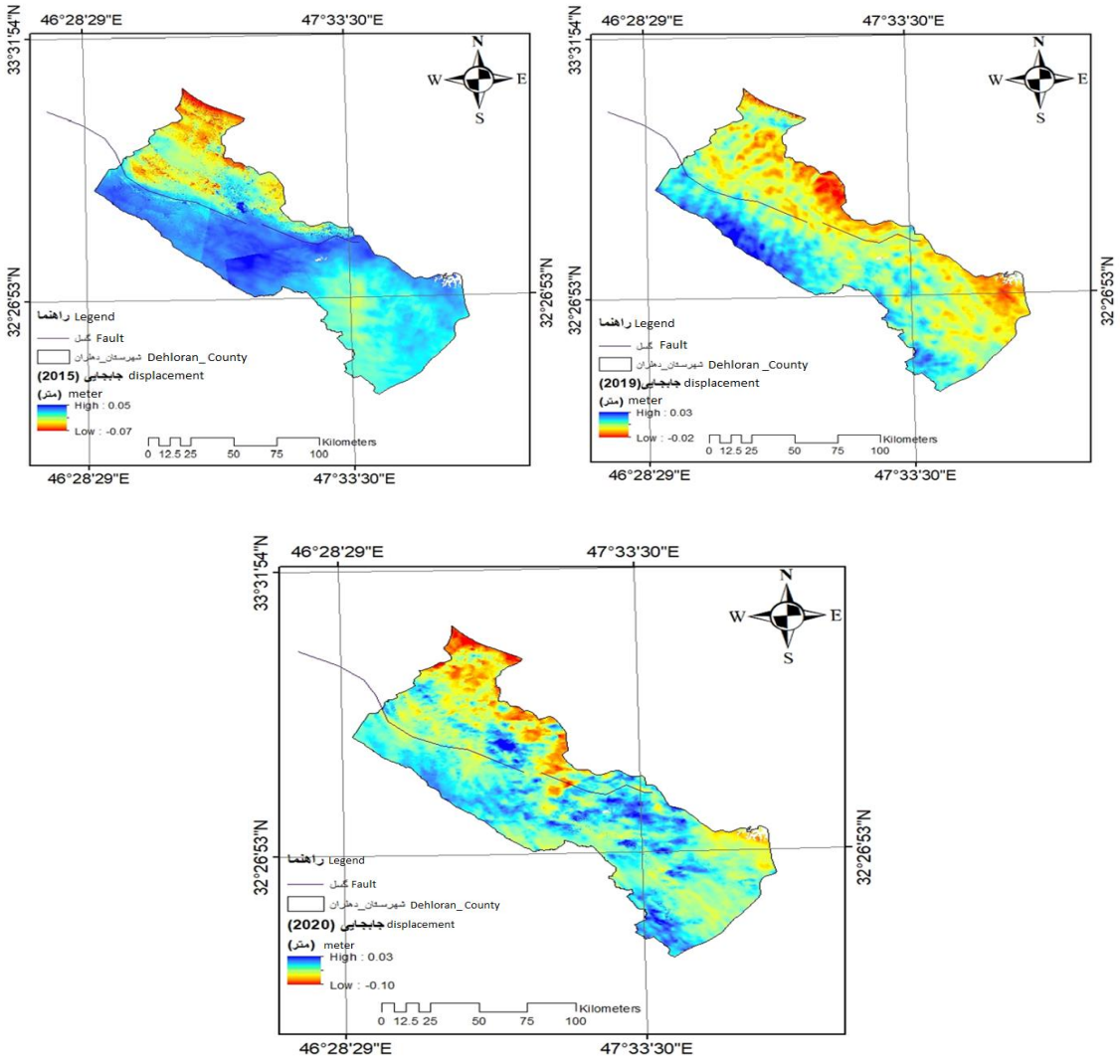


شکل ۷- نقشه میزان جابجایی سطح زمین به سانتیمتر در شهرستان دهلران

Fig.7. Map of land surface displacement in centimeters in Dehloran County

نقشه جابجایی سال ۲۰۱۹: محدوده تغییرات ارتفاع: از ۰/۰۲- تا ۰/۰۳+ سانتیمتر. نسبت به سال ۲۰۱۵، دامنه تغییرات ارتفاعی کاهش یافته است که نشان‌دهنده دوره‌ای از تثبیت نسبی زمین پس از زلزله‌های قبلی است. تغییرات در مناطق مرکزی و شمالی به شکل ترکیبی از پایین رفتگی و بالاآمدگی پراکنده مشاهده می‌شود. این روند می‌تواند بیانگر کاهش فعالیت‌های زمین‌ساختی در این بازه زمانی یا جابجایی گسل‌های فرعی پس از زمین‌لرزه‌های اصلی باشد. نقشه جابجایی سال ۲۰۲۰: محدوده تغییرات ارتفاع: از ۰/۱۰− سانتی‌متر تا ۰/۰۳+سانتی‌متر. افزایش میزان پایین رفتگی (حداکثر ۰/۱۰- سانتی‌متر) نسبت به سال ۲۰۱۹ نشان می‌دهد که در این بازه زمانی فعالیت لرزه‌ای مجدد در منطقه رخ داده است. تغییرات شدیدتر در مقایسه با سال ۲۰۱۹ می‌تواند ناشی از یک زمین‌لرزه جدید یا حرکت مجدد گسل‌های منطقه باشد. شدت جابجایی در مناطق شرقی و جنوب‌شرقی بیشتر است، که نشان‌دهنده تأثیر گسل‌های فعال در این نواحی است.

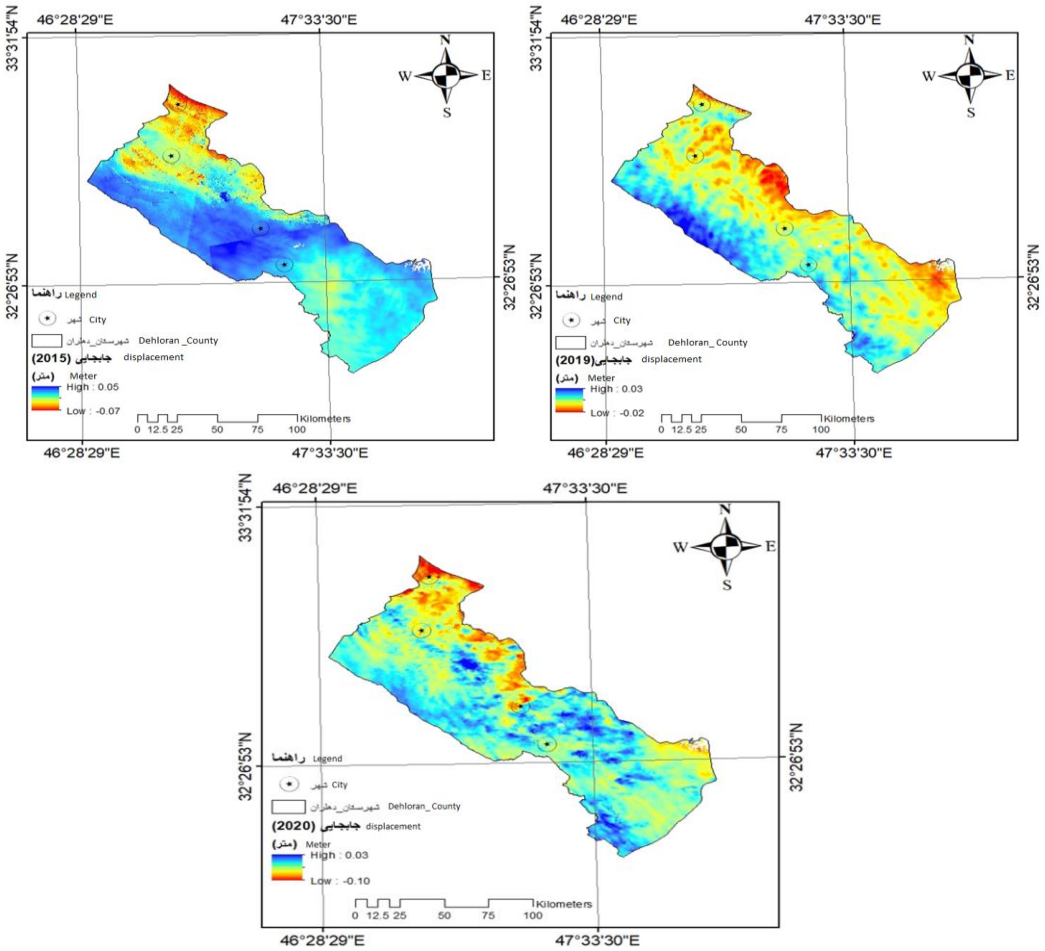
افزایش شدت پایین رفتگی در ۲۰۲۰: مقایسه نقشه‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که در سال ۲۰۲۰ میزان پایین رفتگی افزایش قابل‌توجهی داشته است. این پدیده معمولاً به دلیل رخداد مجدد زمین‌لرزه و یا تغییرات تنش‌های زمین‌ساختی در طول زمان اتفاق می‌افتد. تغییرات ناهمگن در سطح زمین: نواحی مختلف جابجایی‌های مثبت و منفی را نشان می‌دهند، که نشان‌دهنده ماهیت پیچیده جابجایی‌های ناشی از گسلش لرزه‌ای و تأثیرات زمین‌ساختی منطقه است. کاهش دامنه تغییرات جابجایی در ۲۰۱۹: این روند نشان می‌دهد که پس از زلزله‌های قبلی، زمین در حال تثبیت بوده، اما با رخدادهای جدید لرزه‌ای در ۲۰۲۰، این روند تغییر کرده است. همبستگی تغییرات جابجایی با فعالیت گسل‌های منطقه: تغییرات مشاهده‌شده با ساختارهای زمین‌شناختی منطقه مطابقت دارد و نشان می‌دهد که حرکت گسل‌ها منجر به جابجایی‌های آشکار در سطح زمین شده است.



شکل ۸- نقشه میزان جابجایی سطح زمین در محل گسل پیشانی کوهستان در شهرستان دهلران

Fig. 8. Map of the land surface displacement at the Kuhistan frontal fault in Dehloran County

شکل ۸ نشان دهنده نقشه‌های جابجایی سطح زمین در منطقه شهرستان دهلران در سال‌های مختلف هستند که با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR) تهیه شده‌اند. بر اساس این تصاویر، تغییرات جابجایی زمین در این منطقه قابل مشاهده است، به‌ویژه در مناطقی که گسل‌ها فعال‌تر هستند. در سال ۲۰۱۵، جابجایی‌های منفی در برخی نواحی بزرگ‌تر از دیگر مناطق است که نشان‌دهنده حرکت زمین به سمت پایین (فرورفتگی) در آن مناطق است. این نواحی در مجاورت گسل‌ها قرار دارند و به‌ویژه در بخش‌های شمالی و جنوبی شهرستان دهلران مشاهده می‌شود. در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰، تغییرات مشابه‌ای در نواحی مجاور گسل‌ها وجود دارد، با این تفاوت که در سال ۲۰۲۰ میزان جابجایی منفی بیشتر به‌ویژه در نواحی شمالی مشاهده می‌شود. در این مناطق، جابجایی‌های منفی در حدود ۰/۱۰ سانتیمتر به چشم می‌خورد، که می‌تواند نشانه‌ای از فعالیت بیشتر گسل‌ها در آن نواحی باشد. این تغییرات جابجایی زمین می‌تواند تأثیرات جدی بر تأسیسات زیربنایی، خصوصاً میادین نفتی و گازی، و همچنین شهرها و روستاهایی که در نزدیکی گسل‌ها قرار دارند، داشته باشد. میادین نفتی و گازی که در این منطقه وجود دارند، می‌توانند به دلیل جابجایی‌های زمین آسیب ببینند، به‌ویژه در مناطق نزدیک به گسل‌ها که احتمال دارد ترک‌خوردگی در لوله‌ها، تجهیزات و تأسیسات به‌وجود آید. همچنین این جابجایی‌ها می‌توانند منجر به افزایش خطر زلزله و تخریب ساختمان‌ها و سازه‌ها در شهرها و روستاهای مجاور شوند. بنابراین، در نظر گرفتن این تغییرات و بررسی اثرات آن بر امنیت و پایداری این تأسیسات حیاتی است.

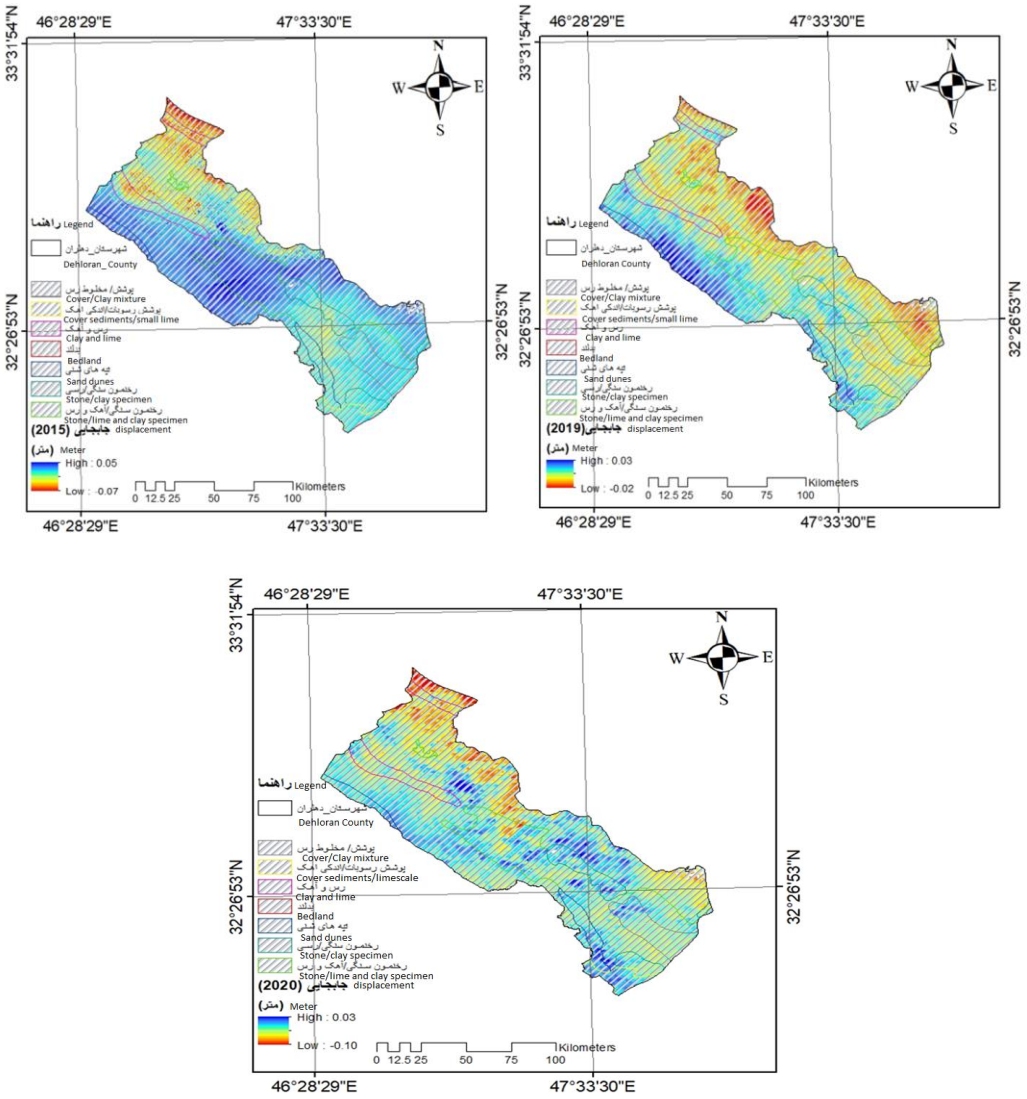


شکل۹- نقشه میزان نرخ جابجایی سطح زمین در شهر پهله، میمه، دهلران، موسیان برای سال سال ۲۰۱۵،۲۰۱۹،۲۰۲۰

Fig. 9. Map of land surface displacement rates in the cities of Pahle, Meimeh, Dehloran and Musian for the years 2015, 2019 and 2020

نقشه‌های جابجایی زمین در شهرستان دهلران و مناطق اطراف آن نشان‌دهنده یک الگوی پایین‌رفتگی قابل‌توجه در بخش‌های شمالی است که در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ روندی رو به افزایش داشته است. شکل ۹ موقعیت شهرهای مشخص‌شده با ستاره در این نقشه‌ها نشان می‌دهد که الگوی نشست زمین در نزدیکی این شهرها نیز مشهود است، اما میزان و شدت آن بسته به موقعیت جغرافیایی و ساختار زمین‌شناسی هر شهر متفاوت است. در مناطق شمالی، از جمله اطراف شهر میمه و دیگر شهرهای شمالی، میزان پایین‌رفتگی بیشتر بوده که می‌تواند به ویژگی‌های زمین‌شناختی، کاهش منابع آب زیرزمینی و تنش‌های ناشی از زمین‌لرزه‌های اخیر مرتبط باشد. در مقابل، شهر دهلران در مرکز نقشه تغییرات کمتری را تجربه کرده است، اما تأثیرات نشست در حومه آن مشهود است. بررسی نقشه ۲۰۱۵ نشان می‌دهد که شهر میمه در ناحیه‌ای با بیشترین میزان نشست قرار دارد. این موضوع می‌تواند ناشی از فرسایش خاک، کاهش سطح آب زیرزمینی و فشارهای زمین‌لرزه‌ای باشد که باعث کاهش پایداری لایه‌های زیرین در این ناحیه شده است. در همین سال، میزان جابجایی در جنوب دهلران کمتر بوده و برخی مناطق حتی دارای جابجایی مثبت (بالاآمدگی) بوده‌اند. شهرهای که در بخش شرقی نقشه قرار دارد، نیز دارای نشست محسوسی بوده که نشان‌دهنده تأثیرات فرونشست گسترده در این ناحیه است. در نقشه ۲۰۱۹، شدت پایین‌رفتگی نسبت به ۲۰۱۵ کاهش یافته، اما الگوی کلی همچنان ثابت باقی مانده است. در این سال، مناطق شمالی دهلران همچنان دچار نشست هستند، اما تغییرات در مرکز و جنوب این شهرستان متعادل‌تر شده است. این موضوع نشان می‌دهد که جابجایی زمین در مناطق شهری به تدریج تثبیت شده، اما مناطق پیرامونی شهرها همچنان در معرض نشست قرار دارند. در نزدیکی میمه و شهرهای دیگر مانند میمه، روند پایین‌رفتگی همچنان ادامه دارد، در حالی که بخش‌هایی از جنوب دهلران تغییرات قابل‌توجهی را تجربه نکرده‌اند. در نقشه ۲۰۲۰، شدت پایین‌رفتگی در برخی مناطق مجدداً افزایش یافته است و در شمال شهر میمه میزان نشست به بیش از ۰/۱۰- سانتی‌متر رسیده است. در مقابل، مناطق جنوبی که در سال ۲۰۱۵ و ۲۰۱۹ نسبتاً پایدار بودند، تغییرات کمتری داشته‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که فرونشست در این ناحیه یک پدیده بلندمدت و مداوم است که تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله زمین‌لرزه‌ها، تغییرات هیدرولوژیکی و ویژگی‌های زمین‌شناسی رخ می‌دهد. با توجه به موقعیت ستاره‌ها در نقشه، می‌توان نتیجه گرفت که مناطق شهری دهلران، میمه و پهله تحت تأثیر مستقیم این جابجایی‌ها قرار گرفته‌اند، اما شدت آن در شمال و شرق شهرستان بیشتر از مرکز و جنوب است. روند تغییرات نشان می‌دهد که جابجایی در شهرهای شمالی مانند میمه بیشتر بوده و شهرهای مرکزی مانند دهلران تغییرات متوسطی را تجربه کرده‌اند، در حالی که در بخش‌های جنوبی، جابجایی کمتری مشاهده شده است. این الگوی تغییرات می‌تواند بر زیرساخت‌های شهری، منابع آب و پایداری زمین در مناطق مختلف تأثیر بگذارد و نیاز به بررسی دقیق‌تر و اقدامات مدیریتی دارد

شکل ۱۰، میزان جابجایی در انواع خاک آمده است. در خاک‌های رسی و آهکی جابجایی از ۷+ تا ۳- و در بدلندها ۳ تا ۲ سانتی‌متر بوده است. بیشترین وسعت منطقه مورد مطالعه را بدلندها (زمین های خشک تحت تاثیر فرسایش شدید و دارای سنگ‌های سست) تشکیل داده است. بیشترین وسعت آن دچار پایین‌رفتگی شده است و کمترین وسعت ازبدلندها دچار بالاآمدگی شده است. یکی از دلایل جابجایی سطح زمین به سانتی‌متر در این مناطق وجود این نوع زمین‌ها است. بیشترین میزان جابجایی در رخنمون سنگی که از آهک رس تشکیل شده، رخ داده است.



شکل ۱۰- نقشه میزان جابجایی سطح زمین در انواع خاک‌ها در شهرستان دهلران برای سال (۲۰۱۵،۲۰۱۹،۲۰۲۰)

Fig. 10. Map of land surface displacement in different types of soils in Dehloran County for the year(2015, 2019, 2020)

بررسی میزان جابجایی سطح زمین در سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ نشان‌دهنده یک روند تدریجی افزایش پایین‌رفتگی در مناطق خاصی از شهرستان دهلران، به‌ویژه در مناطقی با خاک‌های سست و بدلندها است. مقایسه نقشه‌های جابجایی با نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه نشان می‌دهد که نوع خاک تأثیر مستقیمی بر میزان نشست زمین داشته است. در سال ۲۰۱۵ (با استناد به روند تغییرات در ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰)، میزان جابجایی نسبت به سال‌های بعد کمتر بوده، اما مناطق با خاک‌های رسی، آهکی و بدلندها از همان زمان دچار نشست شده‌اند. در این سال، بیشترین تغییرات در شمال شهرستان و اطراف شهر میمه مشاهده شد که احتمالاً به دلیل افت سطح آب زیرزمینی و فرسایش شدید خاک‌های سست در این مناطق بوده است. در همین دوره، مناطق با رخنمون‌های

سنگی پایدارتر بوده و تغییرات کمتری را تجربه کرده‌اند. در سال ۲۰۱۹، شدت جابجایی در مناطق دارای خاک‌های رسی و آهکی افزایش یافته است، به‌طوری که تغییرات بین ۷+ تا ۳- سانتی‌متر ثبت شده است. با این حال، بدلندها که بیشترین وسعت منطقه را تشکیل می‌دهند، دچار تغییرات شدیدی شده‌اند. میزان جابجایی در این خاک‌ها از ۳- تا ۲+ سانتی‌متر متغیر بوده است، به این معنا که برخی مناطق دچار فرونشست شدید شده‌اند، درحالی‌که مناطق محدودی از بدلندها دچار بالاآمدگی شده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که فرایندهای فرسایشی و حرکت مواد سطحی در این مناطق بسیار فعال بوده و به ناپایداری بیشتر آن‌ها کمک کرده است. در سال ۲۰۲۰، شدیدترین میزان پایین‌رفتگی ثبت شده است، به‌خصوص در مناطق دارای رخنمون سنگی آهک‌دار که جابجایی ۱۰- سانتی‌متر را تجربه کرده‌اند. این رخنمون‌ها که از سنگ‌های آهکی و رسی تشکیل شده‌اند، به دلیل نفوذپذیری پایین و فشارهای تکتونیکی دچار نشست بیشتری شده‌اند. در مقابل، برخی مناطق که در سال ۲۰۱۹ دچار نشست بودند، تغییرات کمتری را نشان می‌دهند که می‌تواند نتیجه پایدار شدن شرایط هیدرولوژیکی و کاهش برداشت آب زیرزمینی باشد. بدلندها همچنان بیشترین وسعت منطقه را پوشش می‌دهند و میزان نشست در این خاک‌ها افزایش یافته است. این موضوع نشان‌دهنده یک روند پیوسته فرسایشی و کاهش مقاومت مکانیکی خاک در اثر گذر زمان است. به‌طور کلی، روند تغییرات از ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که فرونشست زمین به‌ویژه در مناطق شمالی و شرقی شهرستان دهلران شدت یافته و ارتباط مستقیمی با نوع خاک و ویژگی‌های زمین‌شناسی دارد. در مناطقی با خاک‌های رسی و آهکی، نشست تدریجی و مداوم بوده، درحالی‌که در بدلندها نشست ناگهانی‌تر و شدیدتر بوده است. این تغییرات نه تنها بر زیرساخت‌های شهری در شهرهایی مانند میمه و دهلران تأثیر گذاشته، بلکه احتمال افزایش ناپایداری زمین در آینده را نیز مطرح می‌کند. بنابراین، پایش مستمر این تغییرات و اتخاذ تدابیر مدیریتی برای کاهش خطرات ناشی از نشست زمین ضروری به نظر می‌رسد.

نتیجه گیری

این تحقیق نشان داد که تکنیک تداخل‌سنجی راداری ابزار بسیار کارآمدی برای برآورد میزان جابجایی سطح زمین ناشی از زمین‌لرزه‌های با بزرگای پایین در شهرستان دهلران است. برای نخستین بار، در این پژوهش، جابجایی سطح زمین ناشی از زمین‌لرزه‌های با بزرگای کمتر از ۵ ریشتر در این منطقه بررسی شد. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً به زمین‌لرزه‌های بزرگ و خسارت‌زا پرداخته‌اند (مانند زلزله بم در سال ۱۳۸۲ و زلزله سرپل ذهاب در سال ۱۳۹۶)، نتایج این تحقیق نشان داد که زمین‌لرزه‌های کوچک نیز در مناطق با لرزه‌خیزی بالا، می‌توانند در طول زمان تأثیرات تجمعی قابل‌توجهی بر زیرساخت‌های شهری، سدها و میادین نفتی و گازی داشته باشند. بررسی‌های انجام‌شده در شهر پهله نشان داد که در هر سه زمین‌لرزه بررسی‌شده، بخش جنوب غربی این شهر دچار پایین‌رفتگی شده است. همچنین، در سایر شهرهای شهرستان دهلران، میزان جابجایی ثبت‌شده در مقیاس چند سانتی‌متر بوده و روند ثابتی را نشان داده است که این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری در برابر این جابجایی‌ها باشد. مطالعه زمین‌لرزه‌ها در این منطقه برای یک دوره ۳۰ ساله نشان داد شهرستان دهلران یکی از مناطق با لرزه‌خیزی بالا در جنوب استان ایلام است. زلزله‌های ثبت‌شده در این منطقه دارای بزرگای ۳ تا ۴/۷ و عمق ۰/۹ تا ۱۲/۷ کیلومتر بوده‌اند که نشان‌دهنده فعالیت لرزه‌ای مستمر این زمین لرزه ها اگر چه عمدتا خفیف هستند اما تداوم آن نشان دهنده فعالیت مداوم گسل هاو احتمال وقوع زمین لرزه های بزرگتر در آینده و امکان جابجایی مداوم سطح زمین است. نقشه‌های تهیه‌شده از جابجایی سطح زمین نشان می‌دهند که میزان جابجایی در برخی مناطق به ۱۰- و ۳+ سانتی‌متر در سال ۲۰۲۰، ۰/۰۲+ و ۰/۰۳- در سال ۲۰۱۹ و ۰/۰۷+ و ۰/۰۵- در سال ۲۰۱۵ رسیده است. همچنین، بررسی رابطه میان گسل‌های فعال و میزان جابجایی نشان داد که در جنوب گسل، میزان جابجایی بیش از ۷- سانتی‌متر و در شمال گسل حدود ۴- سانتی‌متر بوده است. این جابجایی‌ها در سطح منطقه در ۱۰ کلاس طبقه‌بندی شده و میزان تغییرات در مناطق انسانی و طبیعی مشخص شده است. در شهر دهلران، میزان جابجایی بین ۱- تا ۶- سانتی‌متر با

دقت ۰.۸ ثبت شده است. همچنین، یکی از میادین نفتی مهم در جنوب شرقی دهلران، در فاصله ۳۰ کیلومتری این شهر، تحت تأثیر این جابجایی‌ها قرار دارد. بیشترین میزان بالاآمدگی و پایین‌رفتگی سطح زمین در ارتفاعات شمالی دهلران (۲۴۹۰ تا ۱۵۳۱ متر) و زمین‌های بدلند (۹۸۵ تا ۵۴۶ متر) مشاهده شده است که عمدتاً از رخنمون‌های سنگی، آهکی و رسوبات فرسایش‌پذیر تشکیل شده‌اند. نتایج این مطالعه تأکید می‌کند که وقوع مکرر زمین‌لرزه‌های کوچک در شهرستان دهلران می‌تواند در طول زمان منجر به تغییرات تدریجی اما قابل‌توجه در سطح زمین شده و آسیب‌های جدی به زیرساخت‌های شهری، روستایی، سدها، و میادین نفتی و گازی وارد کند. علاوه بر این، جابجایی‌های زمین می‌توانند باعث ناپایداری سازه‌های مهم و کاهش بهره‌وری منابع نفت و گاز شوند. بنابراین، پایش مستمر این مناطق و مقاوم‌سازی زیرساخت‌های شهری و صنعتی ضروری است تا از خسارات احتمالی در آینده جلوگیری شود.

References

Abdulmaleki, A., Maleki, A., & Khazaei, A. (2021). Monitoring of land elevation displacement and analyzing its geomorphological effects using remote sensing data. *Journal of Remote Sensing and Geographic Information Systems in Natural Resources, 12*(4), 118-95. [In Persian] https://doi.org/10.30495/girs.2021.681011

Atzori, S., Manunta, M., Fornaro, G., Ganas, S., & Salvi, S. (2008). Postseismic displacement of the 1999 Athens earthquake retrieved by the differential interferometry by synthetic aperture radar time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 113*(B9), 1–14. https://doi.org/10.1029/2007JB005504

Auriac, A., Spaans, K. H., Sigmundsson, F., Hooper, A., Schmidt, P., & Lund, B. (2013). Iceland rising: Solid Earth response to ice retreat inferred from satellite radar interferometry and visocelastic modeling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118*(4), 1331–1344. https://doi.org/10.1002/jgrb.50082

Baran, I., Stewart, M. P., Kampes, B. M., Perski, Z., & Lilly, P. (2003). A modification to the Goldstein radar interferogram filter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41*(9), 2114–2118. https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.817212

Basareh, M., Joudeki, M., Farzipoursain, A., & Safaei, H. (2013). Seismic survey and earthquake hazard analysis in the area of Dehloran County. Paper presented at the Proceedings of the Conference of the Iranian Society of Engineering and Environmental Geology, Ferdowsi University of Mashhad. [In Persian]

Burgmann, R., Rosen, P. A., & Fielding, E. J. (2000). Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28*(1), 169–209. https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.169

Delong, S. B., Donnellan, A., Ponti, D. J., Rubin, R. S., Lienkaemper, J. J., Prentice, C. S., ... & Parker, J. W. (2016). Tearing the terroir: Details and implications of surface rupture and deformation from the 24 August 2014 M6. 0 South Napa earthquake, California. *Earth and Space Science, 3*(10), 416-430. https://doi.org/10.1002/2016EA000176

Hanssen, R. F. (2005). Satellite radar interferometry for deformation monitoring: a priori assessment of feasibility and accuracy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 6*(3–4): 253–260. https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.10.004

Ho Tong Minh, D., Hanssen, R., & Rocca, F. (2020). Radar interferometry: 20 years of development in time series techniques and future perspectives. *Remote Sensing*, *12*(9), 1364. https://doi.org/10.3390/rs12091364

Joyce, K. E., Wright, K. C., Samsonov, S. V., & Ambrosia, V. G. (2009). Remote sensing and the disaster management cycle. *Advances in Geoscience and Remote Sensing*, *48*(7), 317-346.

Maghsoudi, Y., & Mahdavi, S. (2016). *Fundamentals of Radar Remote Sensing*. Khajeh Nasiruddin Toosi University of Technology Publications. [In Persian]

Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, *36*(4), 441-500. https://doi.org/10.1029/97RG03139

Mehrabi, A., & Pourkhosravani, M. (2018). Measuring the amount of ground surface displacement caused by the 1383 Dahuieh (Zarand) earthquake in Kerman province and identifying its causal fault using radar interferometry technique. *Quantitative Geomorphology Research*, *7*(1), 61-73. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1397.7.1.5.9

Sansosti, E., Casu, F., Manzo, M., & Lanari, R. (2010). Space-borne radar interferometry techniques for the generation of deformation time series: An advanced tool for Earth's surface displacement analysis. *Geophysical Research Letters*, *37*(20), 1–9. https://doi.org/10.1029/2010GL044379

Sarychikhina, O., Glowacka, E., Mellors, R., Vazquez, R., Munguia, L., & Guzman, M. (2009). Surface displacement and groundwater level changes associated with the 24 May 2006 Mw5.4 Morelia fault earthquake, Mexicali Valley, Baja California, Mexico. *Bulletin of The Seismological Society of America*, *99*(4), 2180–2189. https://doi.org/10.1785/0120080228

Shami, S., Mashhadi Hosseinali. M., & Babaei, S. (2019). Analysis of large-scale displacements using radar interferometry technology in open-pit mines (case study: Golgohar mine, Sirjan). *Journal of Surveying and Spatial Information Engineering*, *10*(3), 41-51. [In Persian] http://gej.issgeac.ir/article-1-329-fa.html

Zare Kamali, M., Al-Husseini Al-Madrassi, S. A., & Naghdi, K. (2017). Comparing the magnitude of the earth’s vertical relocation using the SBAS algorithm in X and C radar bands (Case study: Tehran lands). *Journal of RS GIS for Natural Resources*, *8*(3), 104-120. [In Persian] http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1396.8.3.7.4

Vol.14, No.2, Summer 2025, p.308-328 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2024.88446.1494 OPEN ACCESS

Trend Analyzing of Land Use Changes and its prediction in Zolachay Watershed

Tayabeh Irani,[1] Hirad Abaghari [2*] , Ali Akbar Rasouli [3]

[1] Ph.D. in Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran
[2] Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran
[3] Professor, Department of Environmental Sciences, Macquarie University, Sydney, Australia

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 10 June 2024

Revised: 01 October 2024

Accepted: 30 October 2024

Available Online: 30 October 2024

Keywords:

Sentinel-2

Markov Chain

Object-Oriented Processing

Land Use Changes

Zolachay Watershed

ABSTRACT

Investigating the prediction of land use changes is one of the crucial factors for understanding environmental transformations at all temporal and spatial scales. The present research aims to examine the trend of changes and predict the future land use status in the Zolachay Watershed located in West Azerbaijan Province, one of the sub-basins of Lake Urmia, in the last 33 years. For this purpose, first, the Sentinel-2 and Landsat 5,7 images for 1990, 2020, 2016, 2010, 2005, 2000, 1995, and 2023 were acquired from their official sites. Then, needed preprocessing methods were applied in various software environments, and the relevant images were produced inside the e Cognition software environment. Then, the nearest neighbor classification model was executed using the object-based method, and land use and landcover maps were generated. Finally, using the Markov Chain Cellular Automata (CA) method, simulations of land use changes for the year 2030 were performed. To assess the accuracy of the CA Markov model, the land use change map for 2023 was validated against the 2023 classification map. The final results indicate that applying knowledge-based methods, especially the nearest neighbor classification, allows for the product of land use maps with a high accuracy coefficient (Kappa 91%), followed by the Markov (CA) model change maps with an acceptable accuracy of 87%. The final results demonstrate that by 2030, agricultural land use will increase by 15.03%, residential areas by 9.0%, and drylands by about 14%. Soil land use will decrease by 23.68% and pastures by 6.5%. Overall, the final models indicate the high accuracy of knowledge-based and object-based methods, as well as the satisfactory performance of the Markov model in the study of land use changes. The findings of this research can serve as a reference in future environmental planning processes, aiming at sustainable recommendations and prudent land utilization.

[*] Corresponding author: Dr. Hirad Abaghari E-mail address: h.abghari@urmia.ac.ir

How to cite this article: Irani, T., Abaghari, H., & Rasouli, A. A. (2025). Analyzing the Trend of Land Use Changes in the Past and Future in Zolachay Watershed. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 14*(2), 308-328. https://doi.org/10.22067/geoeh.2024.88446.1494

©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

Understanding land use changes is fundamental for analyzing environmental dynamics and managing natural resources at multiple scales. Remote sensing data combined with simulation models like the Cellular Automata-Markov (CA-Markov) enables effective monitoring and spatiotemporal prediction of land use patterns. Advanced object-based classification methods, using software such as eCognition, improve the accuracy of land cover analysis. Numerous global and regional studies demonstrate the efficacy of these approaches in assessing land use trends. This study aims to analyze the land use changes in the Zolachay watershed, a sub-basin of Lake Urmia, from 1990 to 2023 and predict future changes up to 2030, utilizing Sentinel-2 satellite imagery and advanced image processing techniques to provide valuable data for watershed management and environmental planning.

Material and Methods

The Zolachay watershed, a sub-basin of Lake Urmia located in the northwest of the lake, covers an area of 2,258 km². Originating from the Qaradash and Saridash mountains near the Iran-Turkey border, the perennial Zolachay River flows through several villages before emptying into the northwest part of Lake Urmia.

In order to produce land use maps in the present study, Landsat 5, 7 and Sentinel 2 satellite images were used, with a spatial resolution of 30 and 10 meters and having various spectral ranges.

Based on the research objective, which is to detect land use changes, considering the knowledge of the study area and Google Earth images and training points taken by GPS, land use classes were divided based on water area use, residential areas, pasture, salt marsh, gardens and irrigated lands, dry lands and soil. Image classification with the object-oriented method was used using the nearest neighbor NNC algorithm and samples were selected for each class according to the visual characteristics, and classification conditions were defined for each land use class. Land use maps were extracted for 8 periods with the object-oriented method, the area of the classified land uses was calculated. In the next step, land use change prediction was performed using Markov and CA-Markov.

In this study, after formatting the classified images and valuing the land use classes, Markov chain calculations were performed using combination functions in TerrSet 2020 software. Then, land use prediction layers were generated and the final results were evaluated. These results were transferred to other software for additional analyses. Subsequently, the digital layers were imported into ArcGIS 10.8 software, targeted analyses and layer combinations were performed, and the final results were extracted.

Results and Discussion

To verify the accuracy of the classification map of the Zolacha watershed in 2023, it was compared with the forecast map in 2023. The values of Kno, Klocation, Klocationstrata and the standard kappa values Kstandard were obtained as 0.87%, 0.93%, 0.93% and 0.84%, respectively. The results show that the area of agricultural land use has increased rapidly, so that the area of irrigated agriculture land use will increase from 36.8% and 89.6% of the total area of the basin in 2016 to more than 39.23% and 46.21% in 2030. And the area of pasture and soil land use will decrease from 36.20% and 47.93% of the total area of the basin in 2016 to 29.7% and 24.25% in 2030, respectively. More precisely, the area of two land uses, irrigated areas

and pastures, has decreased, and dryland, residential, orchards and irrigated lands and salt marshes have increased. And it is predicted that in 2030, the area of land uses, irrigated areas and pastures will decrease, and the area of residential, orchards and irrigated lands, dryland and salt marshes will increase. Finally, the land uses of irrigated areas and orchards, dryland, residential, irrigated areas and salt marshes with an area of 188.74, 157.61, 3.78, 8.1 and 0.12 km2 of total area in 1990 will reach 18.528, 63.484, 36.24, 9.2 and 0.001 km2 of total area in 2030. Based on the results of the land use change trend in the present study, the most land use changes are related to the conversion of soil and pasture land to total irrigated land and orchards, dryland and residential land.

Conclusions

From the results obtained, practical strategies and measures can be taken to control land use change and preserve natural lands. These measures can include measures to preserve sensitive areas such as water areas and pastures, sustainable development of gardens, and upgrading urban infrastructure in residential areas. These approaches seek to maintain ecological and economic balance in the region and can help improve the quality of life of the community and protect the environment. Also, land use change is evaluated as a balancing factor of ecological, hydrological, and economic components, and its effects can affect the economic situation and lifestyle of the people of the region. These findings can be used in the future environmental planning process, especially in the development of sustainable recommendations and principled land use.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۳۲۸-۳۰۸

نشریه علمی
جفرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2024.88446.1494 دسترسی آزاد

تحلیل روند تغییرات و آینده نگری کاربری اراضی حوضه آبخیز زولاچای

طیبه ایرانی[۱]، هیراد عبقری*[۲]، علی اکبر رسولی[۳]

[۱] دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ایران
[۲] دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ایران
[۳] استاد گروه علوم محیطی، دانشگاه مک کواری، سیدنی، استرالیا

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۹

کلمات کلیدی:

سنتینل۲

زنجیره مارکوف

پردازش شیءگرا

تغییرات کاربری اراضی

حوضه‌آبخیز زولاچای

چکیده

بررسی پیش‌بینی تغییرات کاربری و پوشش اراضی از جمله عوامل مهم برای درک تحولات محیطی در تمام مقیاس‌های زمانی و مکانی می‌باشد. هدف پژوهش حاضر بررسی روند تغییرات گذشته و پیش‌بینی وضعیت آتی کاربری اراضی حوضه آبخیز زولاچای واقع در استان آذربایجان غربی یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه در ۳۳ اخیر است. به‌همین منظور ابتدا تصاویر Sentinel2 و Lansat 5, 7، برای سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۶، ۲۰۲۰، ۱۹۹۵ و۲۰۲۳ دریافت گردید. سپس روش‌های پیش‌پردازش در محیط نرم‌افزارهای مختلف اعمال و تصاویر مربوطه به محیط نرم‌افزار eCognition ارسال گردید. در این محیط با استفاده از روش شیءگرا مدل طبقه‌بندی نزدیک‌ترین همسایگی اجرا و نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی تولید شد. در نهایت با استفاده از روش CA مارکوف شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی برای سال ۲۰۳۰ انجام شد. برای بررسی صحت مدل CA مارکوف، نقشه تغییرات پیش‌بینی شده سال ۲۰۲۳ با نقشه طبقه‌بندی ۲۰۲۳ صحت‌سنجی شد. نتایج پژوهش نشان داد که با کاربرد روش‌های دانش‌پایه به ویژه طبقه‌بندی نزدیک‌ترین همسایگی امکان تولید نقشه‌های کاربری اراضی با دقت بالا ضریب کاپا۹۱٪ مکان‌پذیر است. ضمنا با اعمال مدل مارکوف نقشه‌های تغییرات کاربری اراضی با دقت قابل قبول ۸۷٪ امکان پذیر است. نتایج نهایی نشان می‌دهد تا سال ۲۰۳۰ میلادی کاربری اراضی کشاورزی ۱۵/۰۳٪ محدوده‌های مسکونی ۰/۹٪ و دیم حدود ۱۴٪ افزایش خواهد داشت. کلاس کاربری خاک در حد ۲۳/۶۸٪ و مراتع به میزان ۶/۵٪ کاهش خواهند داشت. در مجموع، مدل‌های نهایی نشان دهنده دقت بالای روش‌های دانش پایه و شیءگرا، و همچنین کارایی مناسب مدل مارکوف در مطالعه تغییرات کاربری اراضی هستند. یافته‌های حاصل از پژوهش حاضر می‌توانند در روند برنامه‌ریزی‌های محیطی آتی، به ویژه با هدف توصیه پایدار و بهره‌برداری اصولی از اراضی، به عنوان مرجع مورد استفاده قرار گیرند.

*نویسنده مسئول : دکتر هیراد عبقری

E-mail address: h.abghari@urmia.ac.ir

مقدمه

یکی از عوامل اساسی در درک تحولات محیطی در تمام مقیاس‌های زمانی و مکانی تغییرکاربری زمین است (Kumar, Bhaskar & Padmakumari, 2015). آگاهی از تغییر کاربری زمین یکی از مهم‌ترین پارامترهای تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی زمین در مقیاس جهانی و منطقه‌ای است. پیشرفت در درک حالات ممکن تغییر کاربری زمین می‌تواند در شناسایی و تشخیص فرآیندهای زمینی، سیلاب و سایر پدیده‌ها در آینده مناسب باشد (Armenteras, Murcia, González, Barón & Arias, 2019)، بنابراین بررسی تغییرات کاربری اراضی می‌تواند به درک بهتر از فرآیندهای انسانی کمک کند و این اطلاعات می‌تواند در جلوگیری از میزان تخریب ایجاد شده تأثیرگذار باشد (Longley, Barnsley & Donnay, 2001). تهیه نقشه تغییرات کاربری اراضی بخش مهمی برای تأمین اطلاعات متخصصان و برنامه‌ریزان توسعه شهری و روستایی محسوب می‌شود. انجام عملیات زمینی جهت تهیه این اطلاعات در مقیاس وسیع با دقت بالا، به دلیل هزینه‌بر بودن، زمان‌بر بودن و گاهی به دلیل عدم امکان اجرای موفقیت‌آمیز، چالش‌های بسیاری را ایجاد می‌کند. امروزه، با پیشرفت فناوری سنجش از راه دور، این روند به عنوان یک راهکار کارآمد در شناسایی، تشخیص، پایش و پهنه‌بندی منابع طبیعی، به ویژه در زمینه تهیه نقشه‌های کاربری اراضی، به‌طور علمی و موثر مورد توجه قرار می‌گیرد (Rasouli, 1999).

منطقه‌های وسیع حوضه‌های آبخیز توسط داده‌های سنجش از دور پوشش داده می‌شوند و همچنین پوشش زمانی زیاد این داده‌ها اطلاعات باارزشی از فرآیند، مکان، نسبت، الگوی تغییر پوشش‌کاربری‌زمین و روند طبیعی فراهم خواهد کرد (Munthali, Botai, Davis & Adeola, 2019). برای شناخت الگوهای کاربری زمین و مکانیزم‌های پیچیده، استفاده از ابزارهایی مانند مدل‌ها و تحلیل حالت‌های ممکن بسیار اثربخش است. برخی از این مدل‌های شبیه‌سازی می‌توانند الگوها و مکانیزم‌های پیچیده را تشخیص داده و حتی در پیش‌بینی حالت‌های آینده نیز به تصمیم‌گیری کمک کنند. از مدل‌هایی که در این زمینه استفاده می‌شوند، می‌توان به مدل‌های اتوماتای سلولی و زنجیره‌ی مارکوف اشاره کرد (Samie, Deng, Jia & Chen, 2017). مدل‌سازی مکانی تغییر کاربری‌زمین به اطلاعاتی در مورد این‌که تغییر در کجا اتفاق خواهد افتاد (مقدار و مکان) و اندازه‌ی تغییر نیازمند می‌باشد. مدل زنجیره‌ی مارکوف اطلاعاتی از مکان ارائه نمی‌دهد و فقط پویایی زمانی را به‌دست می‌آورد اما مدل اتوماتای سلولی CA در مقایسه با مدل زنجیره‌ی مارکوف، دارای مولفه مکانی می‌باشد، که با قانون‌های خاصی از سلول‌های همسایه تغییر در آینده محاسبه می‌شود. خروجی مدل مارکوف از نظر ماهیت، مکانی نیست؛ یعنی در آن از موقعیت جغرافیایی کاربری‌های زمین هیچ آگاهی و دانشی وجود ندارد. مدل مارکوف روش سلول‌های خودکار به‌همراه زمان t+1 برای پیش‌بینی موقعیت کاربری‌ها به‌کار گرفته می‌شود. مدل CA مارکوف مولفه‌های مجاورت مکانی را به توزیع مکانی به مدل زنجیره‌ی مارکوف احتمال تبدیل کاربری‌ها و دانش کاربر را اضافه می‌کند (Misagh, Neysani Samani & Tomanain, 2018). مدل CA مارکوف در پیش‌بینی زمانی-مکانی بسیار مفید است چون روند تغییرکاربری زمین در نظر می‌گیرد (Mujiono, Harmantyo, Rukmana & Nadia, 2017). به طور کلی، توانایی شبیه‌سازی و مدل‌سازی حالت‌های ممکن مختلف با به‌کارگیری روش‌های نوین در پردازش تصاویر ماهواره‌ای و استفاده از مدل‌های کارآمد در تحلیل‌های مکانی، امکان پیش‌بینی و بررسی تغییرات زمانی-مکانی کاربری زمین را فراهم می‌آورد. استفاده از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای یکی از مهمترین روش‌ها برای استخراج اطلاعات کاربردی است (Blaschke, 2010). در حال حاضر طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای با سه روش کلی پردازش شیءگرا، پیکسل‌پایه و آموزش‌گرای انجام می‌شود (Jouybari Moghadam, Akhundzadeh & Sarajian, 2014). اخیراً، یک روش نوین شیءگرا برای تجزیه و تحلیل تصویر به کار گرفته می‌شود که قطعه‌بندی سطح پایین بدون دانش را با روش‌های طبقه‌بندی فازی سطح بالا و مبتنی بر دانش ادغام می‌کند. این روش جدید با استفاده از نرم افزار eCognition که یک محیط شیءگرا برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای فراهم می‌کند، طراحی شده است. در روش طبقه‌بندی شیءگرا، اطلاعات طیفی، شکل، و بافت‌ها به طور همزمان در نظر گرفته می‌شوند. معمولاً، خطاهای متعددی در روش‌های طبقه‌بندی مبتنی بر پیکسل قابل انتظار است که باید با توجه به قدرت تفکیک مکانی سنجنده و سایر عوامل مؤثر، شناسایی شوند. اما در

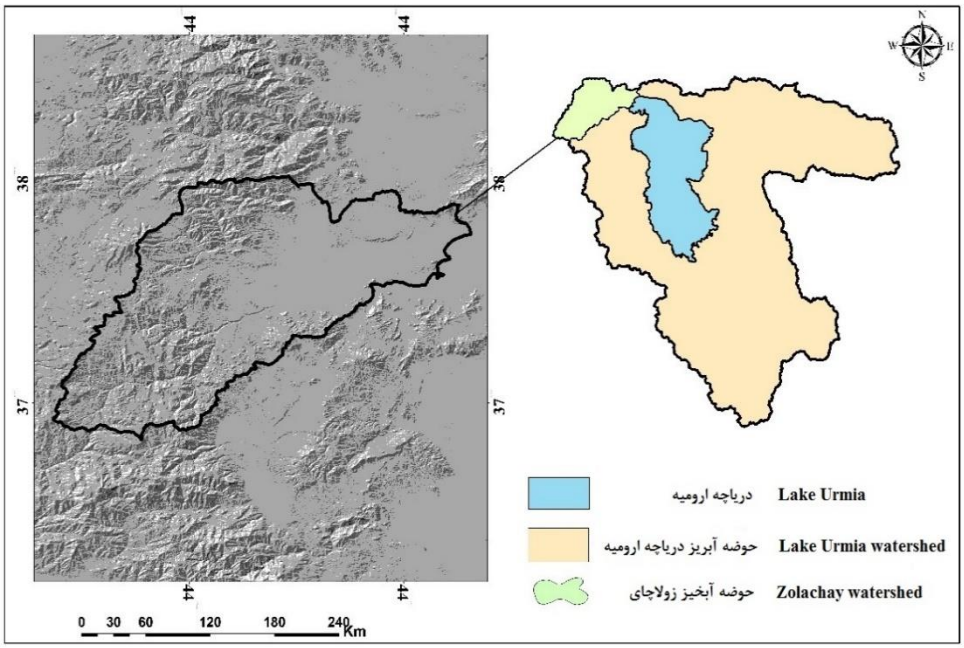
روش‌های شیءگرا، مجموعه‌هایی از پیکسل‌های نسبتاً مشابه عارضه مشخصی را نشان می‌دهند. بنابراین، مجموعه پیکسل‌های مشابه تحت یک عنوان شناسایی شده و سپس عملیات طبقه‌بندی و فرآیندهای تقسیم‌بندی بر روی این مجموعه اعمال می‌شود (Rasouli, 1999). در این بخش از پژوهش به بررسی و مرور نتایج انجام شده، به چند نمونه بارز در خارج از کشور و ایران اشاره می‌گردد. مونسالی و همکاران (Munthali et al., 2019)، با استفاده از شبکه سلول خودکار مارکوف، تغییرات کاربری اراضی مالاوی برای بازه زمانی ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۵ با ترکیب اطلاعات GIS و سنجش از دور پیش‌بینی کرد. نتایج نشان دادند کاهش مساحت جنگل‌ها به نسبت ۶۴ درصد از بیشترین تغییرات است. همچنین در پژوهشی دیگر ایگو و همکاران (Igué, Houndagba, Gaiser & Stahr, 2022)، با استفاده از روش شیءگرا، نقشه کاربری اراضی حوضه‌های اویم و اونین با دقت کلی ۸۷ درصد تهیه شد و به عنوان کارآمدترین روش معرفی گردید. همچنین وصلتی و همکاران (Weslati, Bouaziz & Sarbeji, 2023)، در پژوهش با استفاده از سنجش از دور و مدل CA-Markov، تغییرات مکانی-زمانی آینده کاربری زمین در حوضه آبریز ملگو مدل‌سازی و ارزیابی شد. نتایج نشان دادند که تغییرات قابل توجهی در LULC در آینده پیش‌بینی می‌شود. همچنین هرسی و همکاران (Hersi, Mulungu & Nobert, 2024)، با استفاده از نرم‌افزار eCognition و داده‌های سنجش از دور، تغییرات LULC در حوضه باهی تانزانیا ارزیابی شد. از SVM برای طبقه‌بندی تصاویر Landsat استفاده شد و مدل زنجیره مارکوف برای پیش‌بینی تغییرات آینده در BMC مورداستفاده قرار گرفت. نتایج نشان دادند که افزایش زمین‌های کشاورزی و عمرانی باعث کاهش جنگل‌ها و مناطق مرتفع خواهد شد. این یافته‌ها برای مدیریت حوضه و فهم تأثیر LULC بر فرآیندهای هیدرولوژیکی ارزشمند هستند. همچنین در ایران محرمی و همکاران (Moharrami, Rasuly & Rostamzadeh, 2016)، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat و تکنیک‌های شیءگرای بین سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۵، تأثیرات پس‌روی دریاچه ارومیه بر روستاهای ساحل شرقی مورد بررسی قرار گرفت. از روش‌های شیءگرا برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای و استخراج کاربری‌های موردنظر استفاده شد. سپس با استفاده از مدل زنجیره مارکوف، وضعیت آتی در منطقه پیش‌بینی شد. نتایج نشان دادند که دریاچه ارومیه کاهش یافته و سطح باغات، نمک‌های مرطوب، پهنه‌های گلی-نمکی، اراضی کشاورزی، و نمک‌های جدید در بازه زمانی مورد مطالعه افزایش یافته‌اند. همچنین در پژوهش عبیات و همکاران (Abiyat, Attar Roshan & Abiyat, 2020)، در ارزیابی و پیش‌بینی تغییرات پوشش‌گیاهی در اهواز، از مدل LCM و زنجیره CA مارکوف با طبقه‌بندی شیءگرا استفاده شد. نتایج نشان داد که پوشش‌گیاهی کاهش یافته، با بیشترین تغییرات مرتبط با تبدیل به نواحی ساخته شده و تغییرات کمتر مرتبط با تبدیل به پهنه‌آبی است. پیش‌بینی‌ها نیز نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۲۹، سطح پوشش‌گیاهی احتمالاً کاهش خواهد یافت. عابدینی و همکاران (Abedini, Pasban & Nezafat Taklhe, 2023)، با استفاده از روش شیءگرا، نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز نیرچای در استان اردبیل تهیه شد. نتایج حاکی از صحت کلی ۹۹ درصد و ضریب کاپا ۰/۸۸ درصد در طبقه‌بندی با الگوریتم نزدیکترین همسایه باشد. همچنین ایرانی و همکاران (Irani, Abghari & Rasouli, 2024)، به پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از روش‌های پردازش شی‌گرا و زنجیره مارکوف در حوضه آبخیز گدار چای پرداختند. نتایج نشان داد روش‌های دانش پایه و شی‌گرا از دقت بالایی برخوردار است و مدل مارکوف نیز کارایی مناسبی در مطالعه تغییرات کاربری اراضی از خود نشان داد. طی چند سال گذشته، یکی از علل خشکی دریاچه ارومیه استفاده بیش از حد از منابع آب سطحی و زیرزمینی بوده است. یکی از دلایل اصلی این استفاده بی‌رویه، تغییر کاربری اراضی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد. هدف اصلی این پژوهش، بررسی دقیق و جامع تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبخیز زولاچای، یکی از زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه، طی دوره زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ و پیش‌بینی این تغییرات تا سال ۲۰۳۰ است. این تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 با تفکیک مکانی ۱۰ متر و به‌کارگیری روش‌های پیشرفته پردازش تصاویر ماهواره‌ای، به تحلیل روندهای مکانی-زمانی کاربری اراضی در این منطقه می‌پردازد.

پژوهش حاضر با هدف ارائه دقیق تغییرات کاربری اراضی در این حوضه و تأثیرات احتمالی آن در آینده، به دنبال ارائه اطلاعاتی برای مدیریت بهینه منابع طبیعی و برنامه‌ریزی محیط‌زیستی است. بررسی گذشته و پیش‌بینی آینده کاربری اراضی در حوضه آبخیز زولاچای می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مهم برای تصمیم‌گیری‌های مرتبط با حفظ و احیای محیط‌زیست دریاچه ارومیه و مناطق اطراف آن مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز زولاچای در بخش شمال‌غربی دریاچه‌ی ارومیه واقع شده است و زیرحوضه از حوضه‌ی آبخیز دریاچه‌ی ارومیه می‌باشد. حدود جغرافیایی آن، بین ´۱۳ °۴۴ تا ´۲۹ °۴۵ طول شرقی و ´۵۲ °۳۷ تا ´۲۴ °۳۷ عرض شمالی قراردارد، وسعت این حوضه ۲۲۵۸ کیلومترمربع می‌باشد. رودخانه زولاچای یکی از رودخانه‌های دایمی شهرستان سلماس می‌باشد. رودخانه زولاچای از قلعه‌های قره‌داش و ساری‌داش با ارتفاع ۲۴۳۰ و ۳۰۹۷ متر از سطح دریا از مرز مشترک ایران و ترکیه سرچشمه می‌گیرد. به‌علت پیوستن آب چشمه‌ها و جویبارها و شاخه‌های فرعی دیرعلی سو، دریک‌چای، سرخلان به میزان آن افزوده می‌شود. این رودخانه در طی مسیر از کنار روستاهای مجاور عبور کرده و سرانجام در شمال غربی دریاچه ارومیه و جنوب قریه کنگرلو به دریاچه می‌ریزد (Nazar Neghad, Hosseine & Mostafazadeh, 2020). موقعیت محدوده مورد مطالعه در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز زولاچای- دریاچه ارومیه

Fig. 1. Geographical location of the Zolachay–Lake Urmia watershed

روش تحقیق

با هدف تولید نقشه‌های کاربری‌اراضی در تحقیق حاضر از تصاونر ماهواره‌ای Landsat 5,7 و Sentinel 2، با تفکیک مکانی ۳۰ و ۱۰ متری و دارا بودن محدوده طیف‌های متنوع استفاده گردید. اطلاعات تصاویر مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در مطالعه تغییر و پیش‌بینی کاربری

Table 1- Satellite image information used for land use change and prediction study

ماهواره Satellite	سنجنده Sensor	مسیر/ردیف Path/Row	بازه زمانی Time	دقت مکانی (متر) Resolution(m)
Landsat 5	TM	169: 33-34	1990.06.02	30
Landsat 5	TM	169: 33-34	1995.06.15	30
Landsat 7	ETM+	169: 33-34	2000.06.03	30
Landsat 7	ETM+	169: 33-34	2005.06.19	30
Landsat 7	ETM+	169: 33-34	2010.06.10	30
Sentinel 2	MSI	T38SMG, SMH	2016.06.23	10.20.60
Sentinel 2	MSI	T38SMG, SMH	2020.06.20	10.20.60
Sentinel 2	MSI	T38SMG, SMH	2023.06.22	10.20.60

پیش پردازش تصاویر ماهواره‌ای

در این پژوهش، پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای به‌منظور اطمینان از دقت و کیفیت داده‌های ورودی برای تحلیل‌های بعدی با دقت و جزئیات انجام شده است. ابتدا تصاویر ماهواره‌ای Landsat و Sentinel-2 با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS و ENVI به فرمت‌های مناسب برای پردازش‌های بعدی تبدیل و آماده‌سازی شدند.. در ادامه، با توجه به اینکه تصاویر Level-2 ماهواره Landsat از پیش تصحیح شده بودند، نیازی به اعمال تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری اضافی نبود، اما برای اطمینان از کیفیت داده‌ها، بررسی‌های دقیق و حذف نویزها انجام گرفت. در خصوص تصاویر Sentinel-2، تصحیحات اتمسفری با استفاده از الگوریتم Sen2Cor صورت گرفت تا تأثیرات جوی کاهش یابد و دقت تحلیل‌ها افزایش یابد. برای پوشش کامل منطقه مورد مطالعه، تصاویر ماهواره‌ای مربوط به محدوده‌های مختلف جغرافیایی به‌صورت موزاییکی ادغام شدند. این فرآیند با دقت بالا انجام شد تا از ترکیب صحیح تصاویر و انطباق درست موقعیت‌های جغرافیایی اطمینان حاصل شود. پس از موزاییک‌سازی، تصاویر به ابعاد و محدوده جغرافیایی مورد نظر برش داده شدند. یکی از مشکلات مهم در پردازش تصاویر Landsat 7، وجود خطوط (Stripe) ناشی از خرابی ابزار تصحیح خطوط اسکن در سال ۲۰۰۳ بود. این خطوط که می‌توانستند تحلیل‌ها را مختل کنند، با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته در نرم‌افزارهای ArcGIS و ENVI شناسایی و حذف شدند. برای رفع این مشکل از تکنیک Gap-Filling استفاده شد تا تصاویر به شکلی بدون خطا و با کیفیت بالا برای تحلیل‌های بعدی آماده شوند. مجموعه این مراحل پیش‌پردازش، داده‌های ماهواره‌ای را به شکل مناسب برای تحلیل‌های مکانی-زمانی و بررسی تغییرات کاربری اراضی آماده ساخت، به‌گونه‌ای که نتایج به‌دست‌آمده از این تحلیل‌ها از بیشترین دقت برخوردار باشند.

پردازش تصاویرماهواره‌ای

پس از ورود تصاویر، ترکیب باندی برای تصاویر سری لندست ۷، ۴، ۲، ۳ و۵ و برای تصاویر Sentinel 2 ترکیبی باندی ۲،۳،۴،۸ و۱۱ انجام گردید. سپس سگمنت‌سازی تصاویر، اعمال شروط، وزن‌دهی به باندها، ویراستاری شی‌های تصویر، طبقه‌بندی اراضی‌زمین

به روش NNC[1]، تولید نقشه‌های پوشش‌زمین و کاربری‌اراضی در محیط نرم‌افزار eCognition Developer 9.5 انجام گردید. در نرم‌افزارeCognition Developer 9.5، هر طبقه‌بندی دارای مراحل مختلف است. این مراحل عموماً به صورت سگمنت‌سازی، نمونه‌برداری و طبقه‌بندی انجام می‌شوند. در مرحله سگمنت‌سازی، تصویر ورودی به بخش‌های کوچکتر (سگمنت‌ها) تقسیم می‌شود تا ویژگی‌های مشابه در هر سگمنت تجمع یابند. سپس در مرحله نمونه‌برداری، نمونه‌هایی از هر سگمنت استخراج می‌شوند که نماینده ویژگی‌های آن سگمنت هستند. در نهایت، در مرحله طبقه‌بندی، با استفاده از الگوریتم‌های مختلف، سگمنت‌ها بر اساس ویژگی‌های مشترک آن‌ها به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند. به‌همین منظور برای سگمنت‌سازی، مقدار ۵۶، ۰/۳ و ۰/۷ به‌ترتیب برای پارامترهای مقیاس، شکل و فشردگی مطلوب بودن در نظر گرفته شد.

براساس هدف پژوهش که آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی است، با توجه به شناخت از منطقه مورد مطالعه و تصاویر Google Earth و نقاط تعلیمی برداشته شده بوسیله GPS، کلاس‌های کاربری براساس کاربری پهنه‌آبی، مناطق مسکونی، مرتع، نمکزار، باغات و اراضی آبی، اراضی دیم و خاک تقسیم‌بندی شد. طبقه‌بندی تصویر با روش شیءگرا از الگوریتم نزدیکترین همسایه NNC استفاده شد و متناسب با خصوصیات بصری نمونه برای هر کدام از کلاس‌ها انتخاب، و شرایط طبقه‌بندی برای هر یک از کلاس‌های کاربری اراضی تعریف شد. نقشه‌های کاربری اراضی برای ۸ دوره با روش شیءگرا استخراج گردید، مساحت کاربری‌ها طبقه‌بندی شده محاسبه گردید. در مرحله بعد پیش‌بینی تغییرات کاربری به کمک مارکوف و CA-مارکوف انجام شد.

پیش‌بینی روند تغییرات با مدل زنجیره مارکوف

با بهره‌گیری از توانایی الگوریتم تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار، از این مدل برای پیش‌بینی کاربری و پوشش سطح زمین در آینده استفاده می‌شود. این مدل با تجزیه و تحلیل یک جفت از نقشه‌های کاربری اراضی، با بهره‌گیری از زنجیره مارکوف، ماتریس احتمال انتقال (Transition Probabilities)، ماتریس مساحت انتقال یافته (Transition Areas) و چند تصویر احتمال شرطی، طراحی شد. براساس تعداد کاربری‌ها، ماتریس احتمال انتقال بیان می‌کند که هر کدام از کاربری‌ها با چه احتمالی به کاربری دیگری منتقل می‌شوند (Mirakhorlo & Rahimzadegan, 2018)، این مدل با ایجاد یک ماتریس انتقال احتمال تغییرات کاربری بین سال اول و دوم پیش‌بینی آینده را انجام داد. محاسبه پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی از طریق رابطه (۱) بدست آمد:

$$S = (T_0 + T_1) = Pij * S(t) \quad (۱)$$

که در آن، S(t) وضعیت کاربری سال اول (T_0) و (T_1) وضعیت کاربری زمان دوم را نشان می‌دهد و Pij ماتریس احتمال انتقال می‌باشد (Hamad, Balzter & Kolo, 2018).

اساس تولید ماتریس احتمال انتقال استفاده از شرایط کاربری اراضی قبلی برای پیش‌بینی بود که از رابطه (۲) استفاده شد:

$$Pij = \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} \cdots p_{1n} \\ p_{1n} & p_{2n} \cdots p_{nn} \end{vmatrix} \left(0 \le Pij \ge 1\right) \quad (۲)$$

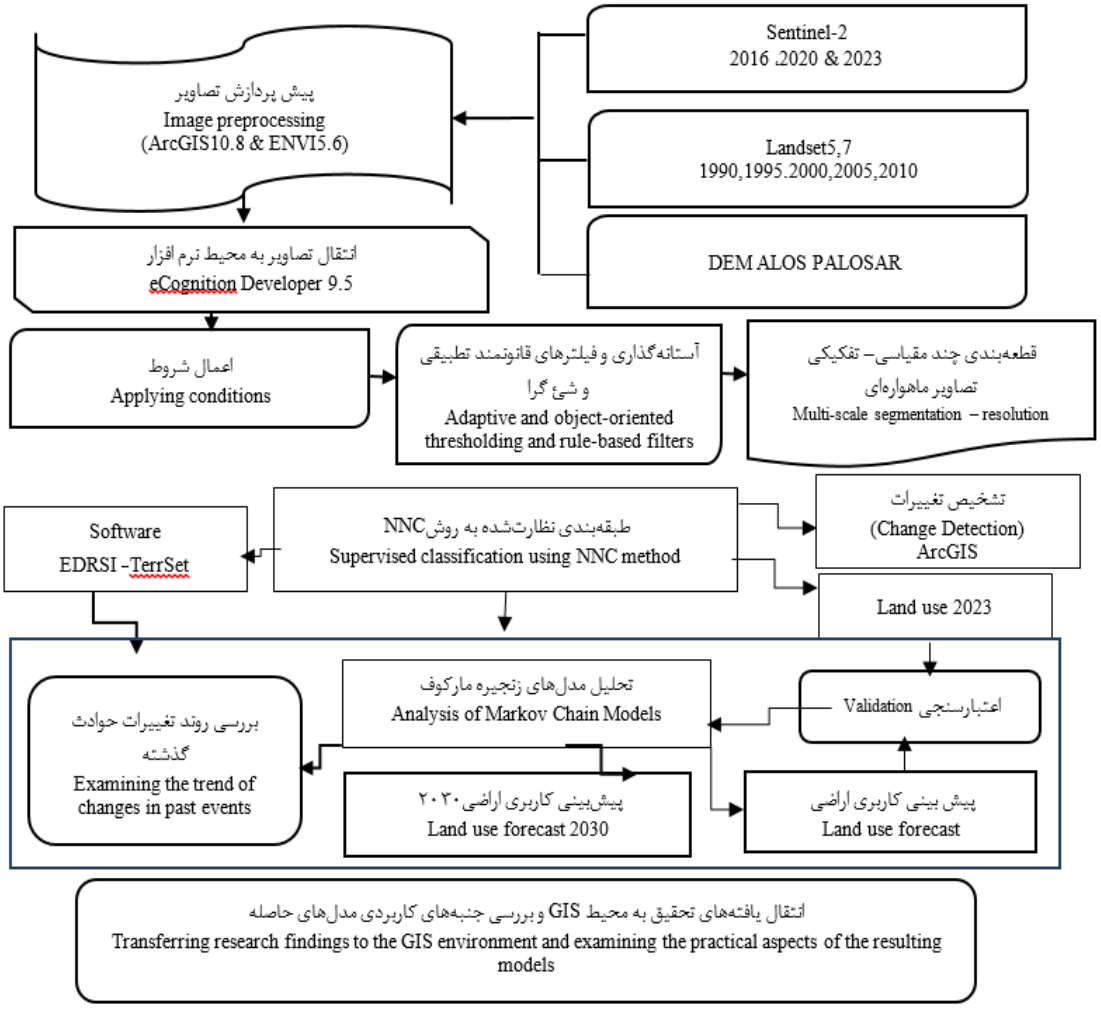
که در آن، P_{ij} ضریب احتمال انتقال کاربری‌ها را از اولین سال (i) تا دومین سال (j) نشان می‌دهد (Mirakhorlo & Rahimzadegan, 2018). جهت تولید نقشه پیش‌بینی کاربری اراضی۲۰۲۳ از نقشه کاربری اراضی تولید شده ۲۰۱۶ و ۲۰۲۰ در نرم افزار eCognition استفاده گردید. ابتدا برای تهیه ماتریس احتمال انتقال و ماتریس مساحت انتقال به‌وسیله مدل مارکوف، جهت صحت‌سنجی نقشه پیش‌بینی استفاده شد. تصویر طبقه بندی شده سال ۲۰۱۶ و ۲۰۲۰ ورودی مدل مارکوف بوده، فاصله زمانی بین این دو تصویر ۴ سال و فاصله زمانی پیش بینی ۳ سال می‌باشد.

1- Nearest Neighbour Classify

در نهایت، برای سنجیدن مدل CA مارکوف با استفاده از ابزار Validate نقشه طبقه‌بندی ۲۰۲۳ و نقشه پیش‌بینی ۲۰۲۳ استفاده شد و بعد از اطمینان از دقت بالای مدل پیش‌بینی برای سال ۲۰۳۰ انجام شد.

پس‌پردازش تصاویرماهواره‌ای

در این پژوهش، پس از فرمت‌سازی تصاویر طبقه‌بندی شده و ارزش‌گذاری کلاس‌های کاربری اراضی، محاسبات زنجیره مارکوف با استفاده از توابع ترکیبی در نرم‌افزار TerrSet 2020 انجام شد. سپس، لایه‌های پیش‌بینی کاربری اراضی تولید و نتایج نهایی ارزیابی گردید. این نتایج برای تحلیل‌های تکمیلی به سایر نرم‌افزارها منتقل شدند. در ادامه، لایه‌های رقومی وارد نرم‌افزار ArcGIS 10.8 شده و تحلیل‌های هدفمند و ترکیب لایه‌ها انجام گرفت و نتایج نهایی استخراج گردید. فرآیند کلی انجام تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است.



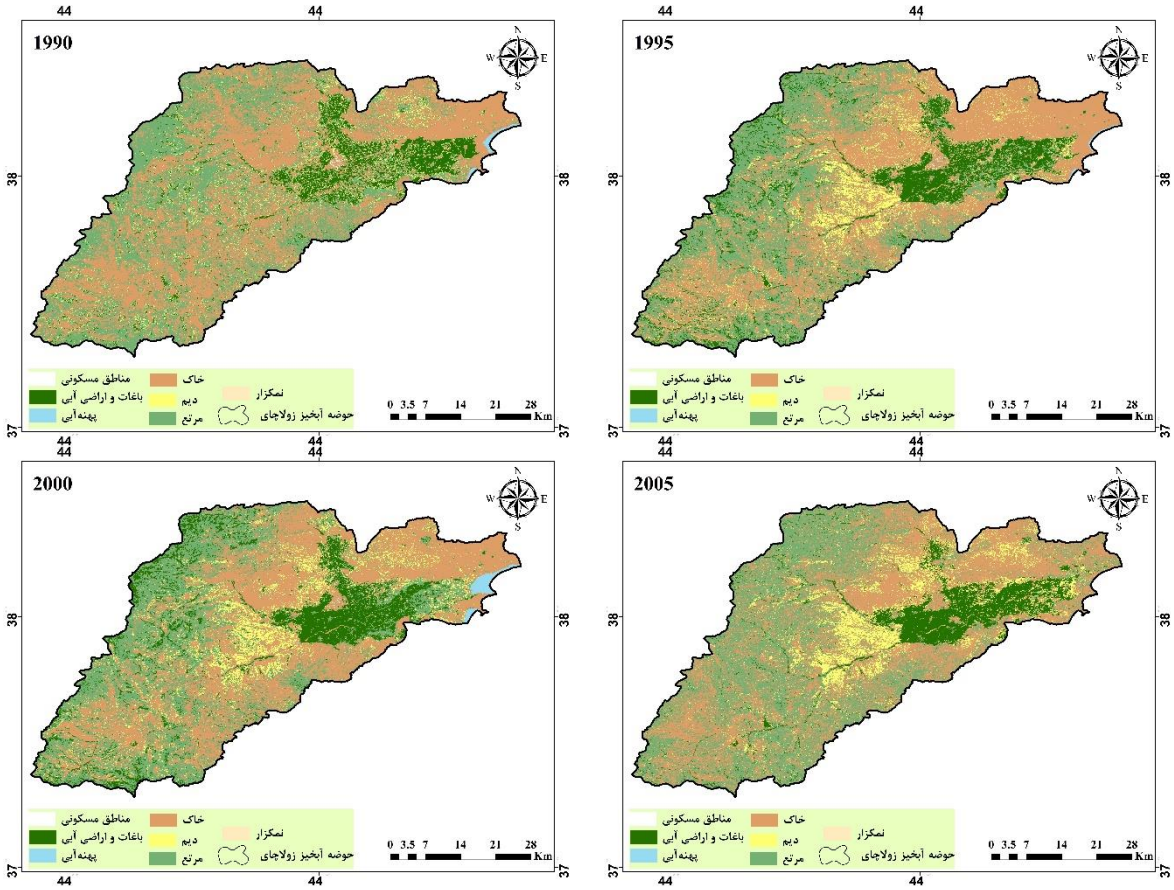
شکل ۲- نمودار جریانی مراحل انجام تحقیق

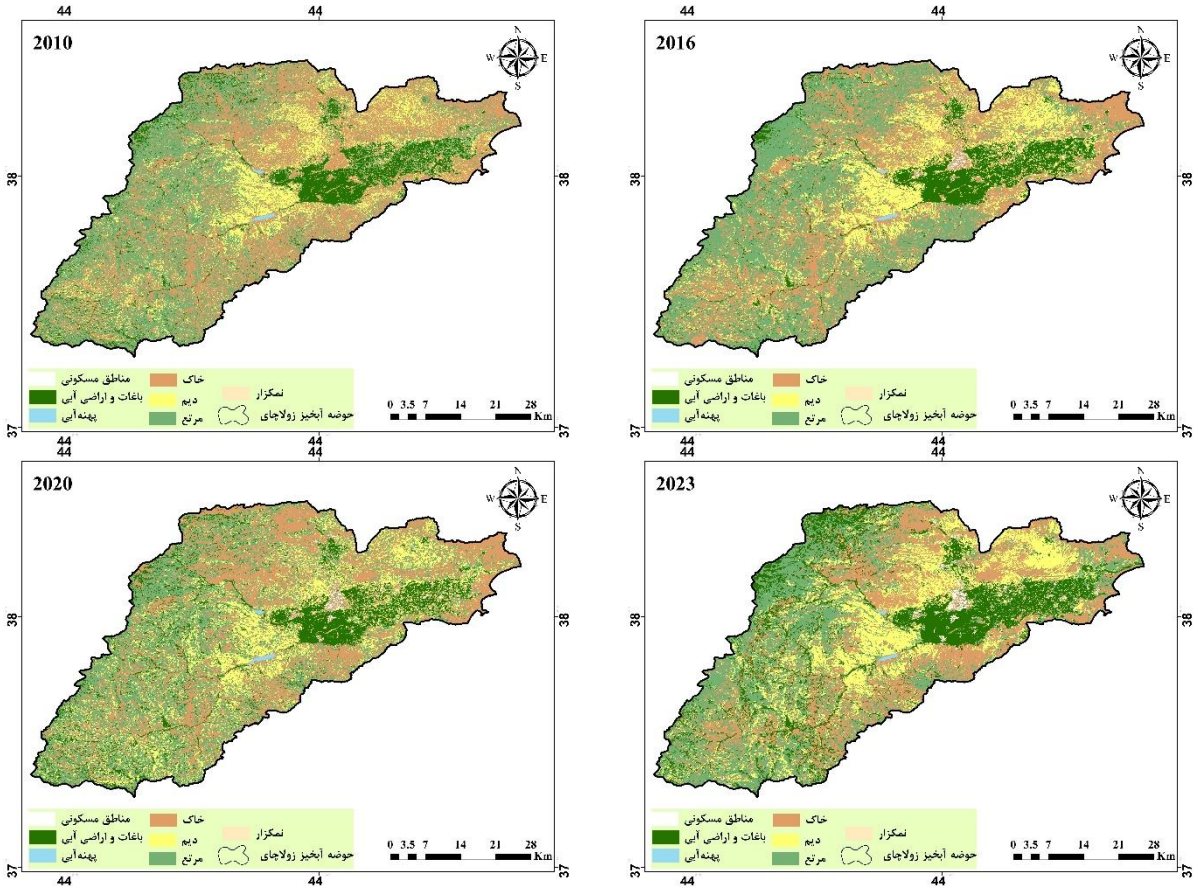
Fig.2. Flowchart of Research Methodology Steps

نتایج و بحث

پردازش تصاویر به روش‌های شیءگرا، ابتدا پیکسل‌های تصاویر ماهواره‌ای براساس میزان بازتابش، شکل، تراکم و سایر ارزش‌های زمین-آماری با اعمال الگوریتم سگمنت‌سازی (Segmentation) به قطعه‌های مشابه تبدیل گردید. در مرحله پردازش، پس از ورود داده‌ها و تصاویر، در این پژوهش برای سگمنت‌سازی، مقدار ۵۶، ۰/۳ و ۰/۷ به ترتیب برای پارامترهای مقیاس، شکل و فشردگی مطلوب بودن در نظر گرفته شد. بعد از مرحله‌ی سگمنت‌سازی برای تصاویر سری Landsat ترکیب باندی ۷، ۴، ۲، ۳ و۵ و برای تصاویر Sentinel 2 ایجاد ترکیبی باندی ۲، ۳، ۴، ۸ و ۱۱ استفاده گردید.

طبقه‌بندی تصاویر با استفاده از روش NNC در هفت کاربری پهنه‌آبی، خاک، باغات و اراضی‌آبی، اراضی دیم، نمکزار، مرتع و مسکونی، نقشه کاربری اراضی برای سال‌های ۱۹۹۰، ۱۹۹۵، ۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۶، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۳ تهیه شد و مساحت هر کاربری محاسبه شد. نقشه کاربری اراضی سال‌های ۱۹۹۰، ۱۹۹۵، ۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۶، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۳ در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در سال ۱۹۹۰، مساحت کاربری‌های پهنه‌آبی، خاک (اراضی کمتر از ۵ درصد پوشش)، باغات و اراضی‌آبی، اراضی دیم، نمکزار، مرتع و مناطق مسکونی به‌ترتیب ۸/۱، ۱۰۸۲/۳۴، ۱۸۸/۷۴، ۱۵۷/۶۱، ۰/۱۲، ۸۱۷/۵۷، ۳/۷۸ کیلومترمربع و در سال ۲۰۲۳ مساحت پهنه‌آبی، خاک، باغات و اراضی‌آبی، اراضی دیم، نمکزار، مرتع و مناطق مسکونی به ترتیب ۲/۹۷، ۶۴۴/۵۶، ۴۰۹/۶۶، ۴۵۸/۳۶، ۰/۲، ۷۲۴/۵۲ و ۱۸/۰۶ کیلومترمربع محاسبه گردید.





شکل ۳- نقشه کاربری اراضی برای سال‌های مورد بررسی در حوضه آبخیز زولاچای-دریاچه ارومیه

Fig. 3. Land use map for the study years in the Zolachay–Lake Urmia watershed

صحت‌سنجی مدل CA مارکوف

برای صحت سنجی نقشه طبقه‌بندی حوضه آبخیز زولاچای سال ۲۰۲۳ با نقشه پیش‌بینی سال ۲۰۲۳، مقایسه گردید. مقادیر Kno، Klocation، Klocationstrata و مقادیر کاپای استاندارد Kstandard به ترتیب برابر با ۰/۸۷ درصد، ۰/۹۳ درصد، ۰/۹۳ درصد و ۰/۸۴ درصد بدست آمدند. با توجه به دقت بالای مدل در پیش‌بینی نقشه تغییرات سال ۲۰۲۳، نقشه تغییرات سال ۲۰۳۰ نیز استخراج گردید. جدول ۲ و ۳ ماتریس مساحت انتقال و ماتریس احتمال انتقال با استفاده از نقشه طبقه‌بندی سال ۲۰۱۶ و ۲۰۲۰ به‌دست آمد. ماتریس مساحت انتقال ۲۰۲۰-۲۰۱۶ به‌عنوان ورودی به مدل CA معرفی شد تا نقشه پیش‌بینی سال ۲۰۲۳ حوضه آبخیز زولاچای به‌دست آید.

براساس نتایج حاصل از جدول۳، ۲/۸۱ کیلومترمربع از پهنه‌آبی در سال ۲۰۱۶ در سال ۲۰۲۰ در همان کاربری پهنه آبی باقی خواهد ماند. هم‌چنین، ۰/۷ کیلومترمربع از پهنه‌آبی به کاربری خاک، ۰/۲۹ به کاربری باغات و اراضی آبی، ۰/۳۶ کیلومترمربع به کاربری مرتع، ۰/۱۹ به کاربری دیم، مناطق مسکونی ۰/۰۱ و ۰/۰۱ به نمکزار در سال ۲۰۲۰ تبدیل خواهد شد.

جدول۲- ماتریس مساحت انتقال یافته تغییر کاربری ۲۰۲۰-۲۰۱۶ با استفاده مدل زنجیره‌ی مارکوف بر حسب km^2

Table 2- Land use change area transition matrix (2016–2020) based on Markov Chain model (in km^2)

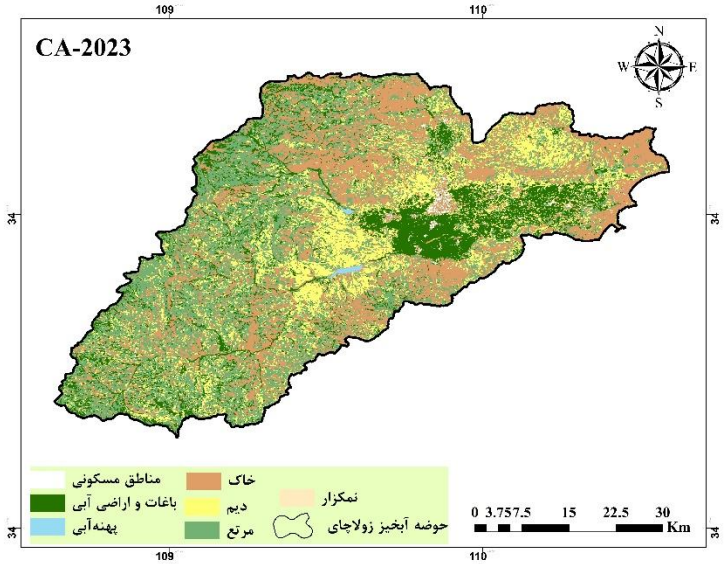
کاربری اراضی Land use	پهنه آبی Water Bodies	خاک Soil	باغات و اراضی آبی Orchards and Irrigated Lands	مناطق مسکونی Residential Areas	مرتع Rangeland	دیم Dry Farming	نمکزار Salt Flats
پهنه آبی Water Bodies	2.81	0.70	0.29	0.01	0.36	0/19	0/01
خاک Soil	1/61	490/96	116/52	8/02	529/03	322/05	21/40
باغات و اراضی آبی Orchards and Irrigated Lands	0/16	75/43	201/04	0/90	116/19	68/09	0/62
مناطق مسکونی Residential Areas	0/02	7/65	0/89	0/89	5/29	3/35	0/90
مرتع Rangeland	0/66	510/31	196/21	5/54	537/56	338/03	7/51
دیم Dry Farming	0/47	288/93	74/82	4/01	335/79	229/45	3/71
نمکزار Salt Flats	0/02	23/01	0/98	0/85	8/24	4/69	33/40

جدول۳- ماتریس احتمال انتقال پیش‌بینی‌شده برای ۲۰۲۳ با استفاده از طبقه‌بندی ۲۰۲۰-۲۰۱۶ بر حسب درصد

Table 3- Predicted transition probability matrix for 2023 based on 2016–2020 classification (in %)

کاربری اراضی Land use	پهنه آبی Water Bodies	خاک Soil	باغات و اراضی آبی Orchards and Irrigated Lands	مناطق مسکونی Residential Areas	مرتع Rangeland	دیم Dry Farming	نمکزار Salt Flats
پهنه آبی Water Bodies	64/49	16/1	6/6	0/1	8/2	4/3	0/2
خاک Soil	0/11	32/9	7/8	0/5	35/5	21/6	1/4
باغات و اراضی آبی Orchards and Irrigated Lands	0/03	16/3	43/5	0/2	25/1	14/7	0/1
مناطق مسکونی Residential Areas	0/10	40/2	4/7	4/7	27/8	17/6	4/8
مرتع Rangeland	0/04	32/0	12/3	0/4	33/7	21/2	0/5
دیم Dry Farming	0/05	30/8	8/0	0/4	35/8	24/5	0/4
نمکزار Salt Flats	0/03	31/1	1/3	1/2	11/1	6/3	45/1

با توجه به نتایج جدول۳، ۶۴/۴۹ درصد از کاربری پهنه‌آبی در سال ۲۰۱۶ در همان کاربری پهنه‌آبی در سال ۲۰۲۳ باقی خواهد ماند. همچنین۱۶/۱ درصد، ۶/۶ درصد، ۰/۱ درصد، ۸/۲ درصد ۴/۳ درصد و ۰/۲ از کاربری پهنه‌آبی در سال ۲۰۱۶ به کاربری‌های خاک، باغات و اراضی آبی،مناطق مسکونی، مرتع، دیم و نمکزار تبدیل خواهد شد. در این ماتریس ردیف‌ها نشان‌دهنده سال شروع ۲۰۱۶ و ستون‌ها نشان‌دهنده سال پایان ۲۰۲۳ می‌باشد. خروجی مدل مارکوف (ماتریس مساحت انتقال) به‌عنوان یکی از ورودی‌های مدل CA مارکوف به مدل معرفی شد. علاوه بر ماتریس مساحت انتقال نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی ۲۰۱۶ به‌عنوان تصویر پایه و تعداد دوره پنج سال به‌عنوان ورودی به مدل تعریف شد و نقشه پیش‌بینی ۲۰۲۳ شکل ۴ تهیه شد.



شکل ۴- نقشه پیش‌بینی کاربری اراضی سال ۲۰۲۳

Fig. 4. Predicted land use map for the year 2023

پس از ایجاد نقشه‌های کاربری اراضی، انجام کنترل دقت و صحت آن‌ها، برای پیش‌بینی تغییرات از مدل مارکوف و مدل CA مارکوف استفاده شد. در ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل CA مارکوف تغییرات آینده، از ضریب کاپا نشان‌دهنده میزان دقت پیش‌بینی مدل است، مقدار این ضریب بین صفر و ۱ می‌باشد، مقدار نزدیک به یک به معنای دقت بالاتر پیش‌بینی مدل است استفاده گردید. برای حوضه آبخیز زولاچای دقت ۰/۹۱ به‌دست آمد. که نشان‌دهنده دقت بالای مدل می‌باشد. نتایج پژوهش حاضر با نتایج یرساو و همکاران (Yirsaw, Wu, Shi, Temesgeh & Bekele, 2017) در مطالعه‌ای مدل‌سازی پیش‌بینی تغییرات وتغییرکاربری اراضی در منطقه ساحلی سو-شی-چانگ Su-Xi-Chang کشور چین، ضریب کاپا برابر با ۰/۹۱ به‌دست آورد. که بیانگر دقت بالای مدل CA مارکوف در پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در آینده می‌باشد مطابقت دارد. برای محاسبه ماتریس مساحت انتقال، ابتدا از مدل مارکوف تصاویر طبقه‌بندی سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۳ استفاده شد. تا ماتریس مساحت انتقال ایجاد شده و به‌عنوان ورودی به مدل CA مارکوف برای پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ معرفی شود. فاصله زمانی بین دو تصویر ۷ سال و فاصله زمانی برای پیش‌بینی در سال ۲۰۳۰، نیز ۷ سال در نظر گرفته شد. در پژوهش حاضر ماتریس مساحت انتقال ۲۰۲۳-۲۰۱۶، نقشه پایه ۲۰۲۳ و تعداد کل تکرارها به‌عنوان ورودی‌های مدل CA مارکوف بود. در این پژوهش تعداد دوره‌ها ۷ سال انتخاب شد. ماتریس مساحت انتقال و ماتریس مساحت احتمال انتقال جدول ۴ و ۵ با استفاده از نقشه طبقه‌بندی سال ۲۰۱۶ و ۲۰۲۳ به‌دست آمد.

جدول ۴- ماتریس مساحت انتقال یافته تغییر کاربری ۲۰۲۳-۲۰۱۶ با استفاده مدل زنجیره‌ای مارکوف بر حسب km2

Table 4- Land use change area transition matrix (2016–2023) based on Markov Chain model (in km²)

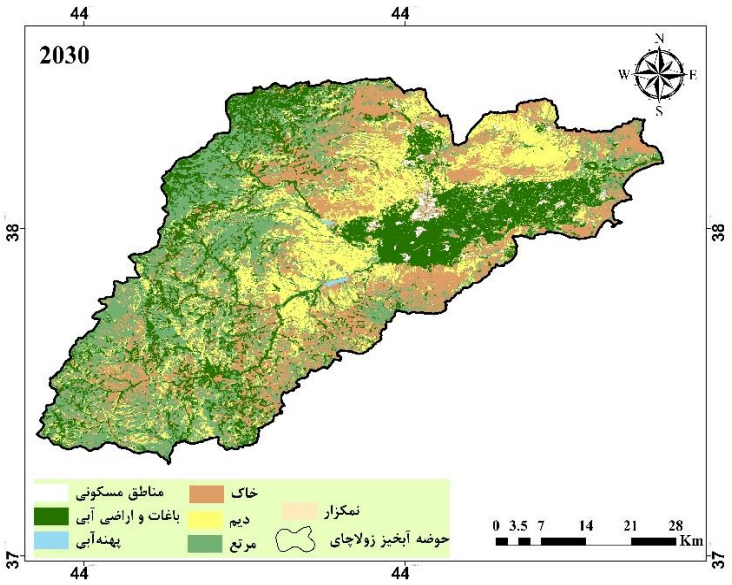
کاربری اراضی Land use	پهنه آبی Water Bodies	خاک Soil	باغات و اراضی آبی Orchards and Irrigated Lands	مناطق مسکونی Residential Areas	مرتع Rangeland	دیم Dry Farming	نمکزار Salt Flats
پهنه آبی Water Bodies	3/39	0/95	0/32	0/02	0/24	0/02	0/00
خاک Soil	0/61	615/20	117/50	15/16	339/48	269/49	6/51
باغات و اراضی آبی Orchards and Irrigated Lands	1/20	19/52	503/25	5/90	117/79	38/36	0/15
مناطق مسکونی Residential Areas	0/01	18/39	1/22	14/48	7/04	6/06	1/33
مرتع Rangeland	0/75	368/57	180/20	11/23	569/70	231/05	0/46
دیم Dry Farming	0/40	173/67	84/70	13/85	226/74	560/81	0/13
نمکزار Salt Flats	0/00	18/07	1/13	0/17	7/22	0/01	38/26

جدول ۵- ماتریس احتمال انتقال پیش‌بینی‌شده برای ۲۰۳۰ با استفاده از طبقه‌بندی ۲۰۲۳-۲۰۱۶ برحسب درصد

Table 5- Predicted transition probability matrix for 2030 based on 2016–2023 classification (in %)

کاربری اراضی Land use	پهنه آبی Water Bodies	خاک Soil	باغات و اراضی آبی Orchards and Irrigated Lands	مناطق مسکونی Residential Areas	مرتع Rangeland	دیم Dry Farming	نمکزار Salt Flats
پهنه آبی Water Bodies	68/59	19/2	6/4	0/4	5/0	0/5	0/0
خاک Soil	0/04	45/1	8/6	1/1	24/9	19/8	0/5
باغات و اراضی آبی Orchards and Irrigated Lands	0/17	2/8	73/3	0/9	17/2	5/6	0/0
مناطق مسکونی Residential Areas	0/01	37/9	2/5	29/8	14/5	12/5	2/7
مرتع Rangeland	0/05	27/1	13/2	0/8	41/8	17/0	0/0
دیم Dry Farming	0/04	16/4	8/0	1/3	21/4	52/9	0/0
نمکزار Salt Flats	0/00	27/8	1/8	0/3	11/1	0/0	58/9

براساس نتایج حاصل از جدول ۴، ۳/۳۹ کیلومترمربع از کاربری پهنه‌آبی در سال ۲۰۱۶ در سال ۲۰۲۳ در همان کاربری پهنه‌آبی باقی خواهد ماند. همچنین، ۰/۹۵ کیلومترمربع از کاربری پهنه‌آبی به خاک، ۰/۰۲ کیلومترمربع به کاربری مسکونی، ۰/۳۲ کیلومترمربع به کاربری باغات و اراضی آبی، ۰/۲۴ کیلومترمربع از کاربری پهنه‌آبی به مرتع و ۰/۰۲ کیلومترمربع به کاربری دیم در سال ۲۰۲۳ تبدیل خواهد شد. با توجه به نتایج جدول۵، ۶۸/۵۹ درصد از کاربری پهنه آبی در سال ۲۰۱۶ در همان کاربری پهنه آبی در سال ۲۰۳۰ باقی خواهد ماند. هم‌چنین، ۱۹/۲ درصد، ۶/۴ درصد، ۰/۴ درصد، ۵ درصد و ۰/۵ درصد از کاربری پهنه‌آبی در سال ۲۰۱۶ به کاربری‌های اراضی خاک، باغات و اراضی آبی، مسکونی، مرتع و کشاورزی دیم تبدیل خواهد شد. در این ماتریس ردیف‌ها نشان‌دهنده سال شروع ۲۰۱۶ و ستون‌ها نشان‌دهنده سال پایان ۲۰۳۰ می‌باشد. خروجی مدل مارکوف ماتریس مساحت انتقال به‌عنوان یکی از ورودی‌های مدل CA مارکوف به مدل معرفی شد. علاوه بر ماتریس مساحت انتقال نقشه طبقه‌بندی کاربری اراضی ۲۰۲۳ به‌عنوان تصویر پایه، تعداد دوره ۷ سال به‌عنوان ورودی به مدل تعریف شد و نقشه پیش‌بینی ۲۰۳۰ تهیه شد. در تهیه نقشه پیش‌بینی سال ۲۰۳۰ از ماتریس مساحت انتقال و ماتریس احتمال انتقال به‌دست آمده سال‌های ۲۰۲۳-۲۰۱۶ استفاده شد. در بازه زمانی سال‌های ۲۰۲۳-۲۰۱۶ بیش‌ترین مساحت انتقال در کاربری‌های ذکرشده به‌ترتیب مربوط به خاک،دیم، باغات و اراضی آبی، مرتع، مسکونی، پهنه‌آبی و نمکزار بود. ماتریس مساحت انتقال، میزان تغییر در تعداد پیکسل‌ها را از یک کلاس کاربری به کلاس دیگر در دوره مشخص را نشان می‌دهد. دلیل بالا بودن مساحت انتقال در کاربری خاک و مرتع را می‌توان افزایش اراضی آبی و باغات و کشاورزی دانست. نتایج نشان می‌دهد که مساحت کاربری‌های کشاورزی به سرعت افزایش پیدا کرده است به‌طوری‌که مساحت کاربری کشاورزی آبی از ۸/۳۶ درصد و دیم ۶/۸۹ کل مساحت حوضه در سال ۲۰۱۶ به بیش ۲۳/۳۹ درصد و ۲۱/۴۶ درصد در سال ۲۰۳۰ افزایش پیدا خواهد کرد. و هم‌چنین مساحت کاربری مرتع و خاک به‌ترتیب ۳۶/۲۰ و ۴۷/۹۳ درصد کل مساحت حوضه در سال ۲۰۱۶ به ۲۹/۷ و ۲۴/۲۵ درصد در سال ۲۰۳۰ کاهش پیدا خواهد کرد. نتایج پژوهش حاضر با نتایج کنگابام و همکاران (Kangabam, Selvaraj & Govindaraju, 2019) در ارزیابی تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی در دلتای نیل مصر طی ۲۸ سال، نشان دادند که گسترش مداوم مناطق کشاورزی و شهری باعث کاهش در پهنه‌آبی و مراتع شده است مطابقت دارد. نقشه کاربری پیش‌بینی شده سال ۲۰۳۰ به روش CA مارکوف با ضریب کاپا ۰/۹۴ تهیه گردید، که در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵- نقشه پیش‌بینی کاربری اراضی سال ۲۰۳۰

Fig. 5. Predicted land use map for the year 2030

آشکارسازی تغییرات برای درک تغییرات منطقه، گسترش و کاهش مساحت کلاس‌ها در سال‌های۱۹۹۰، ۱۹۹۵، ۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۶، ۲۰۲۰، ۲۰۲۳ و ۲۰۳۰ به کیلومترمربع در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶- مساحت کاربری اراضی به کیلومترمربع

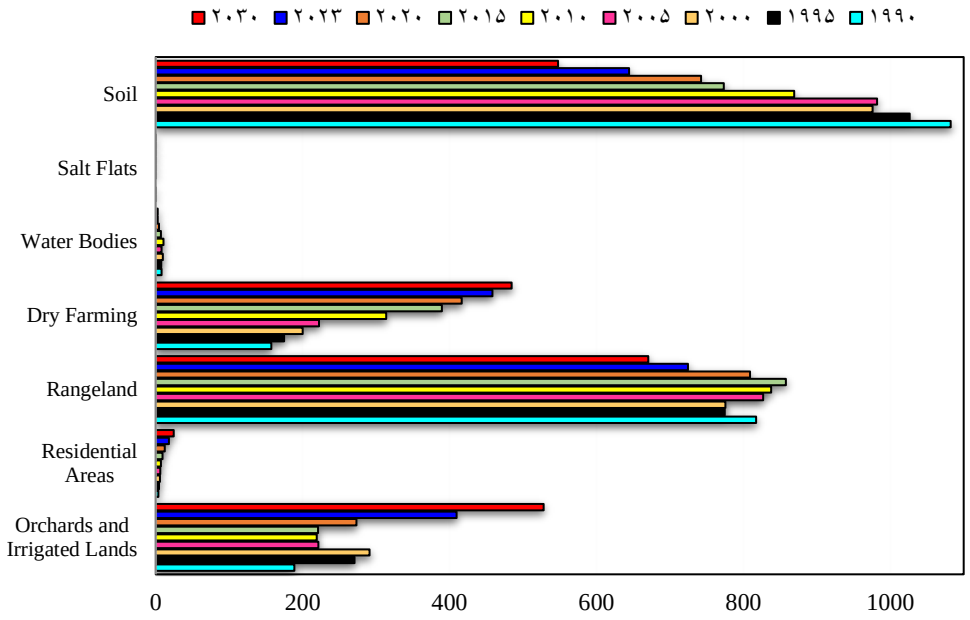
Table 6- Land use area (km²)

کاربری اراضی Land use	مساحت (کیلومترمربع) Area (Km²)								
	1990	1995	2000	2005	2010	2016	2020	2023	2030
باغات و اراضی آبی Orchards and Irrigated Lands	188/74	270/46	291/06	221/30	219/41	221/11	273/16	409/66	528/18
مناطق مسکونی Residential Areas	3/78	4/54	5/82	6/03	7/16	9/08	12/39	18/06	24/36
مرتع Rangeland	817/57	774/52	775/63	826/78	838/07	857/95	809/19	724/52	670/63
دیم Dry Farming	157/61	174/65	200/16	222/19	313/87	389/57	416/45	458/36	484/63
پهنه آبی Water Bodies	8/10	7/57	9/56	8/05	10/38	7/22	4/31	2/97	2/90
نمکزار Salt Flats	0/12	0/06	0/00	0/01	0/15	0/03	0/05	0/20	0/001
خاک Soil	1082/34	1026/5	976/17	982/01	869/35	773/27	742/67	644/56	547/52

باتوجه به جدول شماره ۶ بیشترین تغییرات از کل مساحت حوضه آبخیز زولاچای، مربوط به کلاس اراضی خاک می‌باشد به گونه‌ای که مساحت این کلاس از ۱۰۸۲/۳۴ کیلومترمربع در سال ۱۹۹۰ به ۶۴۴/۵۶ کیلومترمربع در سال ۲۰۲۳ رسیده است به بیان دقیق‌تر مساحت دو کاربری خاک، پهنه‌آبی و مرتع مقدار کاهشی و اراضی دیم، مسکونی، باغات و اراضی آبی و نمکزار مقدار افزایشی داشته است. و پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۳۰ مساحت کاربری خاک، پهنه‌آبی و مرتع، کاهشی و مساحت کاربری مسکونی، باغات و اراضی آبی، دیم و نمکزار، افزایش یابد. در نهایت کاربری‌های اراضی آبی و باغات، دیم، مسکونی، پهنه‌آبی و نمکزار با مساحت ۱۸۸/۷۴، ۱۵۷/۶۱، ۳/۷۸، ۸/۱ و ۰/۱۲ کیلومترمربع کل مساحت در سال ۱۹۹۰ به ۵۲۸/۱۸، ۴۸۴/۶۳، ۲۴/۳۶، ۲/۹ و ۰/۰۰۱ کیلومترمربع کل مساحت در سال ۲۰۳۰ خواهد رسید. نتایج پژوهش حاضر با نتایج تحقیق فتح‌اللهی رودباری و همکاران (Fathollahi Roudbary, Nasir Ahmadi & Khan Mohamadi, 2018) در پژوهشی در شهرستان نکا به مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل‌ساز تغییر سرزمین پرداختند. ایشان در مطالعه خود از تصاویر ماهواره Landsat استفاده کردند. نتایج حاصل از مطالعه این پژوهشگران نشان داد که در طی سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۶ اراضی جنگلی ۲۲۹۷ هکتار کاهش داشته و بیش‌ترین تغییرات مربوط به تبدیل اراضی جنگلی به کشاورزی بوده‌است. همچنین نتایج پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی آینده نشان داد که تا سال ۲۰۳۰ مساحت اراضی کشاورزی و مناطق شهری افزایش و مساحت جنگل کاهش می‌یابد، مطابقت دارد. براساس نتایج این پژوهش، افزایش مساحت کاربری‌های کشاورزی، به‌ویژه زمین‌های کشاورزی آبی و باغات در حوضه آبخیز زولاچای، منجر به افزایش مصرف منابع آب خواهد شد. این یافته‌ها با نتایج تحقیق روشنگر و همکاران (Roushangar, Aalami & Gol Mohammadi, 2022) همخوانی دارد که با استفاده از زنجیره مارکوف به بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی بر مصرف آب کشاورزی در حوضه دریاچه ارومیه طی ۲۰ سال آینده پرداخته‌اند. در آن مطالعه، تصاویر ماهواره‌ای Landsat در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ به کمک الگوریتم SVM طبقه‌بندی شدند. سپس اطلاعات مربوط به تغییر الگوی کشت و میزان منابع آب ورودی به دریاچه ارومیه محاسبه گردید. با استفاده

از مدل‌های LCM و CA-MARKOV، تغییرات کاربری اراضی برای سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که مساحت زمین‌های کشاورزی آبی و باغات از ۱۴۵۰ و ۳۹۵ کیلومترمربع در سال ۲۰۰۰ به ۳۶۰۰ و ۱۶۵۰ کیلومترمربع در سال ۲۰۴۰ افزایش می‌یابد، که این تغییر باعث افزایش نیاز به آب کشاورزی از ۱۵۰۰ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۰۰ به بیش از ۴۱۰۰ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۴۰ خواهد شد. دلیل بالا بودن احتمال انتقال کاربری اراضی آبی و باغات را می‌توان گرایش مردم به سمت درآمدهای حاصل از باغداری و ایجاد باغ در منطقه مورد مطالعه دانست. براساس پیش‌بینی مدل CA مارکوف سطح باغات و کشاورزی آبی در مجاور منابع آبی و نیز در مجاور اراضی کشاورزی آبی موجود افزایش خواهد یافت. که دلیل آن را می‌توان در با توسعه زراعت آبی و استفاده از روش‌های آبیاری قطره‌ای و غیره توسط کشاورزان مرتبط دانست. علاوه بر این، دلیل افزایش مساحت باغات را می‌توان علاقه مردم به داشتن باغ شخصی و درآمد ناشی از محصولات باغی دانست.

نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های ابوراس و و همکاران (Aburas, Abdullah, Ramli, Ash'aari & Ahamad, 2018) هم‌خوانی دارد، که پیش‌بینی کرده‌اند در ده سال آینده مساحت اراضی کشاورزی و شهری به دلیل توسعه اقتصادی افزایش خواهد یافت. علاوه بر این، نتایج پژوهش حاضر با مطالعه رسولی و همکاران (Rasouli, Asgarova & Safarov, 2021) نیز تطابق دارد. در این تحقیق، تغییرات کاربری اراضی (LU/LC) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 در سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱ بررسی شد. این مطالعه از تکنیک‌های پیشرفته شیءگرا و مدل‌های زنجیره مارکوف و خودکار سلولی (CA) برای پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی استفاده کرد. نتایج نشان داد که تغییرات عمده‌ای در مراتع و جنگل‌ها به صورت کاهش مساحت و در زمین‌های بایر و رها شده به صورت افزایش قابل توجه وجود دارد. دقت کلی مدل ۰/۹۵ و ضریب کاپا نزدیک به ۹۴٪ بود، که تأیید می‌کند تغییرات قابل توجهی در نقشه‌های کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه رخ داده است. روند تغییرات کاربری اراضی در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶- روند تغییرات کاربری اراضی به روش شیءگرا

Fig. 6. Land use change trends using object-based method

براساس نتایج حاصل از روند تغییرات کاربری اراضی در پژوهش حاضر، بیش‌ترین تغییرات کاربری مربوط به تبدیل کاربری خاک و مرتع به کل اراضی آبی و باغات، دیم و مسکونی را نشان می‌دهد، که با نتایج بیرهانو و همکاران (Birhanu, Masih, Van Der Zaag, Nyssen & Cai, 2019)، در پژوهشی بر روی حوضه آبریز گومارا[1] اتیوپی نشان دادند در مدت ۲۹ سال در اتیوپی مساحت اراضی کشت شده افزایش یافته و در مقابل مساحت مراتع کاهش یافته است. این تغییرات باعث کاهش حجم آب‌های جاری حوضه آبریز شده است مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

تغییرات در نحوه استفاده از اراضی، به ویژه در زمینه کشاورزی، به عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل موثر در کاهش سطح آب دریاچه ارومیه و نتایج منفی بر محیط زیست پیرامون آن تلقی می‌شود. این مسئله به عنوان یک چالش مهم در سطح ملی و بین‌المللی نیز مورد توجه قرار گرفته است.به همین دلیل، هدف این مطالعه بررسی وضعیت گذشته، فعلی و پیش‌بینی وضعیت آینده کاربری اراضی در حوضه آبخیز زولاچای در استان آذربایجان غربی، یکی از زیرحوضه‌های مهم حوضه آبریز دریاچه ارومیه است. جهت تحلیل و تشخیص تغییرات کاربری اراضی حوضه آبخیز زولاچای، ابتدا تغییرات کاربری برای ۳۳ سال اخیر مورد بررسی قرار گرفت و برای پیش‌بینی کاربری اراضی سال ۲۰۳۰، از تصاویر Sentinel 2 سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۳ استفاده شد. برای اعتبارسنجی مدل، نقشه شبیه‌سازی شده برای سال ۲۰۲۳ با نقشه واقعی حاصل از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای همان سال مقایسه شد. ضریب کاپا استخراج شده نشان‌دهنده قابلیت بالای مدل CA مارکوف در شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبخیز زولاچای است. پس از تولید نقشه‌های کاربری برای سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۳ و دستیابی به دقت مورد نیاز برای نقشه پیش‌بینی سال ۲۰۲۳، با استفاده از مدل CA مارکوف، پیش‌بینی برای سال ۲۰۳۰ انجام شد و نقشه تغییرات کاربری اراضی برای سال ۲۰۳۰ تهیه گردید ضریب کاپای ۰/۹۱ نشان می‌دهد که مدل CA مارکوف برای پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در این منطقه قابلیت بالایی دارد. در کل، روش‌های دانش‌پایه، شیءگرا، و مدل مارکوف نشان داده‌اند که دارای دقت بالا و عملکرد مناسبی در تحلیل تغییرات کاربری اراضی هستند. براساس نتایج به‌دست‌آمده، پیش‌بینی می‌شود که در آینده، سطح اراضی آبی و باغات، مناطق مسکونی و نمکزار در منطقه افزایش خواهند یافت. این یافته‌ها می‌توانند در پیش‌بینی تأثیرات تغییر کاربری اراضی بر رسوب‌زایی، سیل‌خیزی و تأثیرات اکولوژیک مورد استفاده قرار گیرند. به عبارت دیگر، تغییرات پیش‌بینی شده می‌توانند به مدیریت بهینه و پایدار منابع طبیعی کمک کنند. از نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان با استراتژی‌ها و اقدامات کاربردی، به‌منظور کنترل تغییر کاربری اراضی و حفظ اراضی طبیعی اقدام کرد. این اقدامات می‌توانند شامل تدابیری برای حفظ مناطق حساس مانند مناطق آبی و مراتع، توسعه پایدار باغات و ارتقای زیرساخت‌های شهری در مناطق مسکونی باشند. این رویکردها به دنبال حفظ توازن اکولوژیک و اقتصادی در منطقه می‌باشند و می‌توانند به بهبود کیفیت زندگی جامعه و حفاظت از محیط زیست کمک کنند. همچنین، تغییر کاربری اراضی به‌عنوان یک عامل متعادل‌کننده مولفه‌های اکولوژی، هیدرولوژی و اقتصاد ارزیابی می‌شود و تأثیرات آن می‌تواند بر وضعیت اقتصادی و سبک زندگی مردم منطقه تأثیر گذار باشد. این یافته‌ها می‌توانند در فرآیند برنامه‌ریزی محیطی آتی، به‌ویژه در تدوین توصیه‌های پایدار و بهره‌برداری اصولی از اراضی، مورد استفاده قرار گیرد.

1- Gomara

References

Abedini, M., Pasban, A., & Nezafat Taklhe, B. (2023). Evaluation and Preparation of Land Use Map of Nirchai Watershed Using object oriented method. *Geography and Human Relationships*, *5*(4), 318-328. [In Persian] https://doi.org/10.22034/gahr.2023.393602.1849

Abiyat, M., Attar Roshan, S., & Abiyat, M. (2020). Evaluating and Predicting Vegetation Changes Pertaining to Land Use Changes using LCM Model and CA-Markov Chain (Case Study: Ahvaz City). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *9*(3), 183-204. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2020.67236.0

Aburas, M. M., Abdullah, S. H., Ramli, M. F., Ash'aari, Z. H., & Ahamad, M. S. S. (2018). Simulating and monitoring future land-use trends using CA-Markov and LCM models. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 169*(1), 012050. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/169/1/012050

Armenteras, D., Murcia, U., González, T. M., Barón, O. J., & Arias, J. E. (2019). Scenarios of land use and land cover change for NW Amazonia: Impact on forest intactness. *Global Ecology and Conservation, 17*, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00567

Birhanu, A., Masih, I., Van Der Zaag, P., Nyssen, J., & Cai, X. (2019). Impacts of land use and land cover changes on hydrology of the Gumara catchment, Ethiopia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*, *112*, 165-174. https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.01.006

Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *65*(1), 2-16. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004

Fathollahi Roudbary, S. M., Nasir Ahmadi, K., & Khan Mohammadi, M. (2018). land use change modeling using LCM module (Case study: NEKA region). *Natural Ecosystems of Iran, 9*(1), 53-69. [In Persian] https://sanad.iau.ir/Journal/nei/Article/983200

Hamad, R., Balzter, H., & Kolo, K. (2018). Predicting land use/land cover changes using a CA-Markov model under two different scenarios. *Sustainability*, *10*(10), 3421. https://doi.org/10.3390/su10103421

Hersi, N. A., Mulungu, D. M., & Nobert, J. (2024). Spatio-temporal prediction of land use and land cover change in Bahi (Manyoni) Catchment, Tanzania, using multilayer perceptron neural network and cellular automata-Markov chain model. *Environmental Monitoring and Assessment*, *196*(1), 29. https://doi.org/10.1007/s10661-023-12201-w

Igué, A. M., Houndagba, C. J., Gaiser, T., & Stahr, K. (2022). Accuracy of the Land Use/Cover classification in the Oueme Basin of Benin (West Africa). *International Journal of AgriScience*, *2*(2), 174-184. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20123239823

Irani, T., Abghari, H., & Rasouli, A. A. (2024). Prediction of Landuse Changes Applying Knowledge-Based and Markov Chain Methods. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(2), 316-338. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.82510.1369

Jouybari Moghadam, Y., Akhundzadeh, M., & Sarajian, M. R. (2014). Estimating snow cover using Landsat 8 satellite images. First International Conference on Environmental Engineering, Tehran. [In Persian] https://civilica.com/doc/347610

Kangabam, R. D., Selvaraj, M., & Govindaraju, M. (2019). Assessment ofland use land cover changes in Loktak Lake in Indo-Burma Biodiversity Hotspot using geospatial techniques. The Egyptian *Journal of Remote Sensing and Space Science, 22*(2), 137-143. http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.04.005

Kumar, K. S., Bhaskar, P. U., & Padmakumari, K. (2015). Application of land change modeler for prediction of future land use land cover: a case study of Vijayawada City. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, *3*(1), 773-783.

Longley, P. A., Barnsley, M. J., & Donnay, J. P. (2001). Remote sensing and urban analysis: a research agenda. http://dx.doi.org/10.4324/9780203306062

Mirakhorlo, M., & Rahimzadegan, M. (2018). Integration of SimWeight and Markov Chain to Predict Land Use of Lavasanat Basin. *Numerical Methods in Civil Engineering, 2*(4), 146-158. https://doi.org/10.29252/nmce.2.4.1

Misagh, N., Neysani Samani, N., & Tomanain, A. (2018). Simulation of Urban Development in Tabriz Using CA-Markov Model and Multi-criteria Decision Making. *Human Geography Research*, *50*(1), 217-231. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jhgr.2017.224800.1007382

Moharrami, M., Rasuly, A. A., & Rostamzadeh, H. (2016). Modeling the Impacts of Urmia Lake Retrogression upon the East Coast Villages by Object-Based Image Analysis Procedure. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, *3*(3), 81-98. [In Persian] http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jsaeh.3.3.81

Mujiono, T. L., Harmantyo, D., Rukmana, I. P., & Nadia, Z. (2017). Simulation of land use change and effect on potential deforestation using Markov Chain-Cellular Automata. In AIP Conference Proceedings, 1862(1), 1-9. https://doi.org/10.1063/1.4991281

Munthali, M. G., Botai, J. O., Davis, N., & Adeola, A. M. (2019). Multi-temporal analysis of land use and land cover change detection for dedza district of Malawi using geospatial techniques. *Applied Engineering*, *14*(5), 1151-1162. http://hdl.handle.net/2263/71103

Nazar Neghad, H., Hosseine, M., & Mostafazadeh, R. (2020). Assessment of Changes in Landuse Connectivity and Pattern using Landscape Metrics in the Zolachai Watershed, Salmas. *Geographical Planning of Space*, *9*(34), 53-66. [In Persian] https://doi.org/10.30488/gps.2020.95381.2570

Rasouli, A. A. (1999). *Fundamentals of Applied Remote Sensing with a Focus on Satellite Image Processing*. Tabriz: Tabriz University. [In Persian]

Rasouli, A. A., Asgarova, M. M., & Safarov, S. H. (2021). Mapping of LC/LU changes inside the Aghdam district of the Karabakh economics region applying object-based satellite image analysis. *Journal of Life Sciences & Biomedicine*, *3*(76), 54-69. http://dx.doi.org/10.29228/jlsb.22

Roushangar, K., Aalami, M. T., & Gol Mohammadi, H. (2022). Effect of Land Use Trends on the Amount of Agricultural Water Consumption in Urmia Lake Watershed in the Next 20 Years Using Markov Chain. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, *12*(2), 115-131. [In Persian] https://doi.org/10.30495/wsrcj.2022.68546.11310

Samie, A., Deng, X., Jia, S., & Chen, D. (2017). Scenario-based simulation on dynamics of land-use-land-cover change in Punjab Province, Pakistan. *Sustainability*, *9*(8), 1285. https://doi.org/10.3390/su9081285

Weslati, O., Bouaziz, S., & Sarbeji, M. M. (2023). Modelling and assessing the spatiotemporal changes to future land use change scenarios using remote sensing and CA-markov model in the mellegue catchment. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *51*(1), 9-29. https://doi.org/10.1007/s12524-022-01618-4

Yirsaw, E., Wu, W., Shi, X., Temesgeh, H., & Bekele, B. (2017). Land use and land cover change modeling and the prediction of subsequent changes in ecosystem service values in a coastal area of China, The Su-Xi-Change region. *Sustainability*, *9* (1204), 2-17. https://doi.org/10.3390 /su9071204

Vol.14, No.2, Summer 2025, p.329-351 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2025.90461.1527 OPEN ACCESS

Modeling the Spatial Variations of Water Quality Components Using Geomorphometry Variables (Case Study: Talesh River Catchments)

Fahimeh Poorfarashzadeh [1], Aghil Madadi [2]*, Mortaza Gharachorlu [3]

[1, 2 & 3] Department of Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 26 October 2024

Revised: 04 January 2025

Accepted: 26 January 2025

Available Online: 26 January 2025

Keywords:

River Water Quality

Geomorphometry

Predictive Modeling

Talesh Catchments

Regression Analysis

ABSTRACT

Understanding the spatial variation in river water quality and the influencing factors is essential, given the growing demand for safe water in drinking, agricultural, and industrial sectors. This study employed a systematic approach to examine the interactions between watershed characteristics and the spatial distribution of water quality parameters in the Talesh region. The research utilized geological maps, a digital elevation model (DEM), and water quality data from 12 hydrometric stations. To assess the interactions, correlation and regression analyses were conducted between geomorphological variables and water quality indicators, specifically total dissolved solids (TDS) and electrical conductivity (EC). The correlation analysis revealed significant associations between eight geomorphological variables including watershed area, mean elevation, average slope, main river length, total stream length, bifurcation ratio, drainage density, and the Gravelius coefficient and the two water quality variables. Correlation coefficients ranged from 0.60 to 0.88, indicating strong relationships. Most associations were direct. Notably, the length of the main river exhibited the strongest correlation with both TDS and EC, suggesting that it is the most influential hydro-geomorphic factor in explaining spatial water quality variability in the Talesh catchments. Regression analysis further demonstrated that reliable predictive models for spatial variation in water quality can be developed using geomorphological variables. These models accounted for up to 98% of the variance in water quality parameters (TDS and EC), underscoring the critical role of watershed characteristics in controlling river water quality.

*Corresponding author: Dr. Aghil Madadi E-mail address: aghil48madadi@yahoo.com

How to cite this article: Poorfarashzadeh, F., Madadi, A., & Gharachorlu, M. (2025). Modeling the Spatial Variations of Water Quality Components Using Geomorphometry Variables (Case Study: Talesh River Catchments). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(2), 329-351. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.90461.1527

©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

Knowledge of the spatial variation in river water quality and the influencing factors is crucial due to the urgent demand for safe water for various uses, including drinking, agriculture, and industry. Recently, river water quality has deteriorated as a result of intensified human activity in densely populated areas. The initial step in the sustainable management of river water quality is to identify the fundamental factors that influence its spatial variation. Among the environmental variables, geomorphological factors play a significant role. The geomorphic characteristics of a watershed influence the transformation of precipitation into runoff and the transport and accumulation of solids and dissolved substances in rivers. The topic of river water quality as an outcome of the watershed system is central to geomorphology, particularly in the context of preserving and restoring river ecosystems. Analyzing the relationships between geology, hydrology, and geomorphology and their connection to river water quality through terrain analysis offers an opportunity to elucidate the specific capacity of geomorphology in modeling hazardous environmental changes. This study aimed to investigate the relationship between catchment characteristics and water quality components to develop predictive models of spatial variations in water quality within the Talesh catchments, which are experiencing increasing water pollution due to the expansion of agriculture and livestock activities, coupled with unstable hydro-geomorphic conditions.

Material and Methods

This study was based on correlation and regression analyses between geomorphometry variables and water quality parameters. The study area consists of 12 mountainous catchments with a total area of 1993 km² in northwestern Iran. The data comprised monthly water quality records from hydrometric stations and an Aster Digital Elevation Model (DEM). Analytical tools included ArcGIS Desktop 10.8, SPSS 19.0, SAGA 7.0, and Excel 2016. The research involved several steps: First, average values for total dissolved solids (TDS) and electrical conductivity (EC) were calculated for 12 stations over a 10-year period (2011–2021). Next, 15 geomorphometric variables were derived for each catchment using the 30-meter DEM within GIS and SAGA environments. These variables included: area, mean altitude, mean slope, mean main stream slope, main stream length, total stream length, bifurcation ratio, drainage density, Gravelius coefficient, elongation ratio, concentration time, mean LS factor, mean ruggedness index, mean terrain convexity index, and the percentage of erodible rocks. After compiling the values for the two dependent variables and 15 independent variables, a correlation matrix was used to determine statistically significant relationships ($p \leq 0.05$). To prepare predictive models for TDS and EC, both the Enter and Stepwise regression methods were employed. The Enter method was used to construct initial models, while the Stepwise method was applied to resolve multicollinearity issues and determine the most influential variables.

Results and Discussion

The correlation analysis identified eight geomorphometric variables catchment area, mean elevation, mean slope, main river length, total stream length, drainage density, concentration time, and ruggedness index that were significantly correlated with TDS and EC. Correlation coefficients ranged from 0.60 to 0.88. Moreover, most relationships were direct, indicating that increases in geomorphometric values were generally associated with increased water quality variables. The strongest correlation was observed between main river length and both TDS and EC, indicating that this variable was the most important hydro-geomorphic factor influencing the spatial variation in water quality across the Talesh catchments. Longer river lengths appeared to degrade water quality, possibly due to greater exposure to diverse land use types, increased pollutant input, and enhanced erosion processes facilitated by the steep gradients typical of the region.

The regression analyses confirmed that reliable predictive models could be developed using geomorphometry variables. The Enter method explained up to 98% of the variance in TDS and EC; however, these models suffered from multicollinearity. This issue was resolved in the Stepwise models, which yielded two effective predictive models. The first model, using only main river length (MRL), explained 78% of the variance in TDS and EC. The second model, incorporating both MRL and slope (S), explained 88% of the variance. A comparison of the regression model statistics revealed that the Stepwise models had higher F-values (31–35) and lower significance levels ($p = 0.000$) compared to the Enter models ($F = 10$, $p = 0.02$), indicating their greater validity and predictive accuracy.

Conclusion

Analyzing the spatial variation in river water quality without a systematic watershed-based approach results in incomplete and potentially misleading interpretations. Because watershed characteristics interact with one another and with land use in complex ways, understanding their effects on water quality is essential for effective forecasting and management. This study demonstrated that terrain and regression analyses can be used to construct reliable predictive models of water quality, which can guide planners and resource managers in addressing urban, rural, and industrial water demands. Correlation results also help identify vulnerable regions by evaluating the strength and direction of relationships between geomorphometry variables and water quality indicators (TDS and EC), thereby aiding in the prioritization of watershed management, conservation, and restoration efforts.

The results suggest that large, high-elevation catchments with long main rivers, low slopes, and high drainage density and concentration time are more susceptible to degraded water quality, primarily due to increased TDS and EC. Such catchments require focused conservation measures. While both regression methods provided useful models, the Stepwise method was more effective in identifying the key predictive variables, particularly main river length and slope, which were consistent with previous research. Conversely, the lithology variable was not a significant predictor in this study unlike in earlier studies due to the low proportion (13%) of erosion-prone formations in the catchments and limitations in the definition of this variable. For future work, we recommend incorporating the percentage area of each geological formation as a more refined approach to modeling the influence of lithology on water quality.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص ۳۵۱-۳۲۹

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2025.90461.1527 دسترسی آزاد

مدل‌سازی تغییرات مکانی مؤلفه‌های کیفی آب با استفاده از متغیرهای ژئومورفومتری (مطالعه موردی: حوضه‌های آبخیز تالش)

فهیمه پورفراش‌زاده [۱]، عقیل مددی [۲*]، مرتضی قراچورلو [۳]

[۱،۲ و ۳] گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷

کلمات کلیدی:

کیفیت آب رودخانه

ژئومورفومتری

مدل‌سازی پیش‌بینی

حوضه‌های تالش

تحلیل رگرسیون

چکیده

آگاهی از تغییرات مکانی کیفیت آب رودخانه‌ها و عوامل موثر بر آن به جهت نیاز مبرم مصارف مختلف انسانی به آب سالم اهمیت اساسی دارد. تحقیق حاضر با در پیش گرفتن رویکرد سیستمی و با هدف مدلسازی روابط کمی بین خصوصیات هندسی حوضه آبخیز و تغییرات مکانی مولفه‌های کیفی آب در حوضه‌های آبخیز تالش انجام گرفت. ابزار تحقیق شامل نقشه‌های زمین‌شناسی، مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، و داده‌های کیفی آب در ۱۲ ایستگاه هیدرومتری بود. به منظور تشخیص و تعیین روابط کمی از تحلیل‌های همبستگی و رگرسیونی بین متغیرهای ژئومورفومتری (۱۵ متغیر) و متغیرهای کیفی کل جامدات محلول (TDS) و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) کمک گرفته شد. دست‌یابی به مدل کلی رگرسیونی از طریق روش‌های جبری و گام به گام میسر شد. نتایج تحلیل همبستگی نشان داد که روابط همبسته معنی‌داری بین ۸ متغیر مساحت حوضه، متوسط ارتفاع، متوسط شیب، طول رودخانه اصلی، طول آبراهه‌ها، نسبت انشعاب، تراکم زهکشی، ضریب گراویلیوس، زمان تمرکز، شاخص ناهمواری و دو متغیر کیفی آب وجود دارد. ضرایب همبستگی از ۰/۶ تا ۰/۸۸ متغیر بود. به‌علاوه، با افزایش میزان متغیرهای مستقل فوق، میزان TDS و EC افزایش یافته و درنتیجه کیفیت آب کاهش یافت. در مدل‌های رگرسیونی حاصل از اعمال روش جبری، نزدیک به ۹۸ درصد واریانس متغیرهای کیفی TDS و EC قابل توضیح بود. در مدل‌های رگرسیونی حاصل از اعمال روش گام به گام با استفاده از دو متغیر طول رودخانه اصلی و شیب حوضه به ترتیب ۷۸ و ۸۸ درصد واریانس متغیرهای کیفی TDS و EC قابل توضیح بود. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که با تکیه بر داده‌های رقومی ارتفاعی و مدل‌های آماری رگرسیونی می‌توان به راحتی و با دقت کافی به مدل‌های کارا و مفید جهت پیش‌بینی تغییرات مکانی TDS و EC در رودخانه‌های تالش دست یافت که برای برنامه‌ریزان و طراحان منابع آب مفید می‌باشد.

*نویسنده مسئول: دکتر عقیل مددی E-mail: aghil48madadi@yahoo.com

مقدمه

رودخانه‌ها مهم‌ترین و متداول‌ترین منبع تامین آب آشامیدنی، کشاورزی و صنعت به‌شمار می‌آیند (Mousavian, Haghizadeh, Dehdari & Hazbavi, 2014). در عصر حاضر با توجه به افزایش جمعیت و متناسب با آن نیاز فزاینده ساکنین کره زمین به آب، فشار بر منابع آبی تبدیل به یک چالش زیست‌محیطی شده است (Shakeri Zare, Karam, Saffari & Kiyani, 2020). از اهم مسائل زیست‌محیطی رودخانه‌ها، کیفیت آب آن‌هاست که همیشه در حد استاندارد نبوده و پویاست. این پویایی از آن‌جا ناشی می‌شود که رودخانه‌ها از بسترها و مناطق مختلفی عبور کرده و با محیط پیرامون خود ارتباط مستقیم دارند(Mousavian et al., 2014). امروزه افت کیفیت آب در داخل حوضه‌های رودخانه‌ای به عنوان یک مخاطره محیطی جدی محسوب می‌شود که سلامت انسان و سایر موجودات زنده را تهدید می‌نماید. آلودگی انسان‌زاد منجر به زوال کیفیت آب بیش از نیمی از دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدهای دنیا شده است که ۹۰ درصد منابع آب شرین مایع روی کره زمین را فراهم می‌سازند (Dai, Zhou, Ma & Zhou, 2017). نتایج بررسی‌ها بر روی رودخانه‌های نقاط مختلف ایران نشان می‌دهد که کیفیت اغلب رودخانه‌ها در وضعیت متوسط تا بد قرار دارد (Mahrooyan, Taghavi, Sarai Tabrizi, Babazadeh, 2020). در کنار آلودگی‌های بیولوژیک که عمدتا با عوامل انسانی (فاضلاب‌های شهری و روستایی) در ارتباط هستند، آلودگی‌های فیزیکی مانند فرسایش و تولید رسوب و مواد معلق که با شاخص‌های فیزیکی مانند کدورت آب، شوری و TDS نشان داده می‌شود، ناشی از هر دو عامل انسانی و طبیعی می‌تواند باشد. ابعاد زیست‌محیطی موضوع افت کیفی آب رودخانه‌ها به دلیل ارتباط درهم‌بافته اجزاء و عناصر سیستم‌های رودخانه‌ای وسیع و نگران‌کننده است. برای نمونه، برداشت شن و ماسه از رودخانه در نگاه اول شاید ساده به نظر برسد، اما این پدیده به واسطه گل‌آلود نمودن رودها، مورفولوژی و اکوسیستم رودها را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Jabbari, 2014). نتایج مقایسه کیفیت شیمیایی آب زلال و گل آلود نشان داده است که میزان درصد رسوب (گل آلودگی)، سختی کل (غلظت کلسیم و منیزیم) و شوری آب (هدایت الکتریکی) در آب گل‌آلود بیشتر است (Montaseri, Amir Ahmadi, Zangeneh Asadi, 2019). ارتباط زوال پوشش گیاهی طبیعی (جنگل و مرتع) حوضه‌های آبخیز با افزایش مواد محلول ورودی به رودخانه‌ها به خوبی نشانگر ارتباط به‌هم‌پیوسته و در خور تامل مسائل زیست‌محیطی با یکدیگر است. تغییر جریان نهر و افزایش تولید رسوب از جدی‌ترین عواقب فعالیت‌های قطع درختان هستند که آثار طولانی‌مدتی را در کانال رودخانه و خصوصیات زیستگاه بر جای می‌گذارند (Allan, 1995). پاک‌تراشی جنگل‌ها، آتش‌سوزی و تخریب مراتع که منجر به تشدید فرسایش خاک شده است، باعث افزایش ورود مواد معدنی، نیتروژن، فسفات و رسوب به اکوسیستم‌های آبی شده و زنجیره غذایی موجودات را تغییر می‌دهد (Ghanbarzadeh & Behniafar, 2014). با این اوصاف، آگاهی از تغییرات مکانی مولفه‌های کیفی آب و عوامل موثر بر آن در مناطق مختلف ضرورت می‌یابد.

هر حوضه‌ای ترکیبی بی‌همتا از خصوصیات چشم‌انداز را شکل می‌بخشد که جملگی بر کیفیت آب رودخانه‌ها تاثیرگذار هستند. خصوصیات طبیع حوضه‌های آبخیز نقش موثری در تغییرات کیفی آب رودها دارند. خصوصیات ژئومورفومتری حوضه‌ها مانند تراکم زهکشی، شیب، ارتفاع و ... در یک زمینه دومتغیره یا چندمتغیره، کیفیت آب را تحت تاثیر قرار می‌دهند. برای مثال، شیب زمین به واسطه خیس‌شدگی (ماندابی) فصلی اثر قوی بر کیفیت آب داشته و از طریق تثبیت یا پخش آب‌های سطحی، تغییرات زمانی- مکانی مواد محلول در کف جنگل را تعیین می‌نماید (Varanka, Hjort & Luoto, 2015). دانش ژئومورفولوژی نقش ارزنده‌ای در در تبیین و تفسیر تغییرات مکانی خصوصیات کمی و کیفی آب رودخانه‌ها دارد. این موضوع به دلیل ارتباط تنگاتنگ علم ژئومورفولوژی با سایر علوم زمین و محیط زیست و به‌ویژه ارتباط آن با علم هیدرولوژی و اکولوژی است. ژئومورفولوژی به عنوان علم مطالعه تغییرات

چشم‌انداز در مرکز علم نوظهور سطح زمین[1] قرار دارد، جایی که پیوندهای زوجی قوی بین دینامیک انسانی، زیست‌شناسی، زیست-شیمی، ژئوشیمی، زمین‌شناسی، هیدرولوژی، ژئومورفولوژی و دینامیک جوی (شامل تغییر اقلیم) برقرار می‌باشد (Murray et al., 2009). در عصر آنتروپوسن، دانش ژئومورفولوژی می‌تواند مهارت‌های مهندسین و اکولوژیست‌ها را ارتقاء بخشیده و رویکرد فرارشته‌ای را در مدیریت منابع زمین شامل گردد (Garcia et al., 2021). موضوع کیفیت آب رودخانه‌ها به عنوان برونداد سیستم حوضه آبخیز در کانون توجه دانش ژئومورفولوژی با هدف حفظ و تجدید حیات اکوسیستم‌های رودخانه‌ای است. کشف ارتباط بین متغیرهای زمین‌شناسی، هیدرولوژی، ژئومورفولوژی با یکدیگر و با خصوصیات کیفی آب رودخانه‌ها با تکیه بر تکنیک «تحلیل سطح زمین[2]» یا ژئومورفومتری فرصتی را پیش می‌آورد تا توان ویژه دانش ژئومورفولوژی در مدل‌سازی تغییرات محیطی مخاطره‌آمیز روشن‌تر گردد. در این میان حتی اثرات فعالیت انسانی بر خصوصیات کیفی آب رودخانه‌ها نیز در اتباط با توزیع لندفرم‌ها و شدت و ضعف فرایندهای ژئومورفیک می‌باشد. برای مثال، کشاورزان از مناطق در معرض رواناب شدید و سیلاب دوری کرده و نواحی نسبتا هموار و دور از سیلاب را برای کشت و زرع انتخاب می‌نمایند.

منطقه تالش واقع در شمال غرب ایران و استان گیلان یکی از نواحی خاص جغرافیایی است که با مسائل و معضلات زیست‌محیطی عدیده‌ای روبروست. گسترش ناموزون و بی‌رویه فعالیت‌های کشاورزی و دام‌پروری در کوهپایه‌ها و دامنه‌های کوهستانی باعث بروز مسئله جنگل‌زدایی شده است. به همان منوال، تغییر کاربری نواحی روستایی که در همسایگی دره‌های جنگلی هستند، به کاربری شهری و مصنوعی باعث تخریب پوشش طبیعی زمین شده است (Zia -Tavana & Amir Entekhabi, 2007; Amir Entekhabi, 2019). پیامد این امر بروز فرایندهای فرسایش و سیل در منطقه بوده است که نمود ویژه آن در افت کیفیت آب رودخانه‌ها قابل ردگیری و مشاهده است. در این راستا، حفظ سلامت حوضه و اولویت‌بندی مکانی عملیات آبخیزداری و احیاء حوضه‌های رودخانه‌ای تالش منوط به کسب آگاهی از نحوه ارتباط بین خصوصیات حوضه آبخیز و متغیرهای کیفی آب می‌باشد که تاکنون مور توجه قرار نگرفته است. پژوهش حاضر با درنظر گرفتن این ضرورت و با هدف مدل‌سازی تغییرات مکانی کیفت آب رودخانه‌ها توسط متغیرهای ژئومورفومتری انجام شد. انتظار می‌رود تهیه چنین مدل‌هایی به برآورد مولفه‌های کیفی آب با صرف زمان و هزینه کم کمک نماید. به‌علاوه آگاهی از نحوه ارتباط بین خصوصیات ژئومورفومتری حوضه‌ها و خصوصیات کیفی آب رودها می‌تواند توجه مدیران و برنامه-ریزان منطقه‌ای را به تمرکز بر پهنه‌های حساس در برابر افت کیفی آب رودخانه‌ها با درنظر گرفتن پیشرانه‌های فیزیکی مهم و موثر بر کیفیت آب رودها به منظور رسیدن به توسعه پایدار حوضه‌های رودخانه‌ای معطوف نماید. در ضمن، استفاده از متغیرهای متعدد که نشانگر جنبه‌های مختلف خصوصیات هندسی حوضه و ارتباط فرم- فرایند در مباحث ژئومورفولوژی است، می‌تواند به عنوان نوآوری این پژوهش مطرح باشد.

پیشینه تحقیق

اهمیت موضوع کیفیت آب رودخانه‌ها در علوم زمین و محیط زیست باعث گرایش سمت و سوی تحقیقات کاربردی به مدلسازی و تشخیص رفتار کیفی آب رودخانه‌ها در ارتباط با عوامل مختلف محیطی شده است. یی و همکاران (Ye, Cai, Liu & Cao, 2009) طی مطالعه تأثیر توپوگرافی و کاربری زمین بر کیفیت آب رودخانه ژیانگ‌ژی واقع در کشور چین این نتیجه رسیدند که عوامل توپوگرافی و کاربری زمین به ترتیب قادر به تعیین ۲۶ و ۱۰/۲ درصد واریانس متغیر کیفیت آب بود. وارانکا و همکاران (Varanka et al., 2015) جهت پیش‌بینی پارامترهای کیفی آب در حوضه‌های بوره‌آل فنلاند از عوامل ژئومورفولوژیک استفاده کردند. نتایج تحلیل همبستگی نشان داد که نهشته‌های کواترنری عوامل مهمی هستند که کیفیت آب را کنترل می‌نمایند.

1- Science of Earth's Surface

2- Terrain Analysis

همچنین تغییرات میزان اسیدیته توسط سنگ‌بستر برهنه و نیز توپوگرافی حوضه قابل تبیین بود. آلمادا و همکاران (Almada et al., 2019) در بررسی اثرات عوامل محیطی بر کیفیت آب رودخانه‌ها در جنوب آمازون دریافتند که متغیرهای طول رود و شیب حوضه در زمره مهم‌ترین پیش‌بین‌گرهای کیفیت آب بودند. لیو و همکاران (Liu et al., 2021) طی مطالعه‌ای که در خصوص اثر متقابل کاربری زمین، خاک و توپوگرافی بر تغییرات کیفیت آب رودها در حوضه‌های کشاورزی کشور چین داشتند، به افزایش نیتروژن و فسفر در شیب‌های میانی (۱۶ تا ۲۸ درجه) و کاهش آن‌ها در شیب‌های تند (۲۸ تا ۸۰ درجه) اذعان کردند. گوانانگا و همکاران (Guananga et al., 2022) جهت تهیه شاخص کیفیت آب و ارتقاء آن در حوضه گوانو کشور اکوادور از متغیرهای شیب و دبی جریان استفاده کردند. ایشان به این نتیجه رسیدند که با افزایش شیب زمین و دبی جریان مخصوصا در بالادست حوضه بر توان خودپالایی رودخانه افزوده شده و کیفیت آب رو به بهبود می‌گذارد. یمانی و همکاران (Yamani, Moghimi, Jodari-E-Eyvazi, Mohamadi & Issaee, 2010) تأثیر عوامل اکوژئومورفولوژی بر کیفیت شیمیایی آب رودخانه کر را مورد مطالعه قراردادند. نتایج حاصل نشان داد که سازندهای زمین‌شناسی و رواناب متأثر از خصوصیات فیزیوگرافی حوضه در کیفیت آب رودخانه مؤثر بوده‌اند.

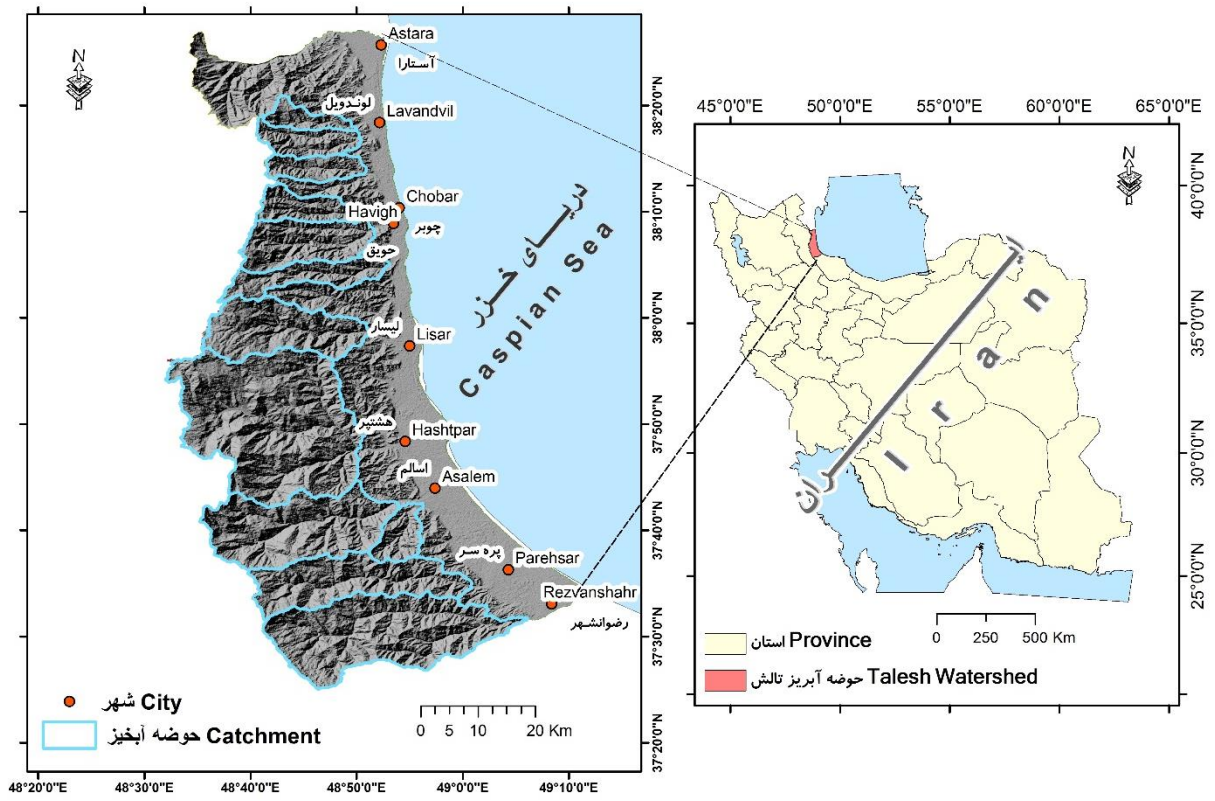
عادلی (Adeli, 2012) طی بررسی وضعیت کیفی منابع آب شهرستان گرگان به نقش موثر عوامل سنگ‌بستر، جهت جریان رودخانه، پوشش زمین بر ساختار کیفی آب اذعان داشت. جباری (Jabbari, 2014) در بررسی اثرات عوامل ژئومورفولوژی بر آلودگی رودخانه سیروان پی بردند که عوامل زمین‌شناسی، مراحل تحول حوضه و پوشش زمین، تعیین‌کننده تغییرات مکانی مقدار کدورت و مواد محلول جامد در حوضه مورد مطالعه هستند.

رضائی مقدم و همکاران (Rezaei Moghaddam, Nikjoo, Hejazi, Khezri & Kazemi, 2017) نیز به اثرات عوامل هیدروژئومورفولوژی (شیب، ارتفاع، دبی، رسوب) بر تغییرات کیفیت آب رودخانه سیمینه‌رود توجه نمودند. فرخانی (Farkhani, 2021) با بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب رودخانه هراز به این نتیجه رسید که مولفه‌های ژئومورفولوژیک واریزه‌ها و زمین‌لغزه‌ها در زمره منابع آلاینده طبیعی آب این رودخانه هستند. دلبری و همکاران (Delbari et al., 2022) طی ارزیابی کیفیت آب رودخانه تجن دریافتند که میزان EC و TDS با حرکت از بالادست رودخانه به پایین‌دست آن دچار افزایش می‌شود. به‌علاوه، ایشان در کنار عوامل انسانی چون فاضلاب‌های شهری و روستایی و صنایع، به اثرات ژئومورفیک برداشت شن و ماسه از بستر رودخانه بر کاهش کیفیت آب رودخانه اذعان داشتند. همایون نژاد و امیریان (Homayoonnezhad & Amirian, 2024) طی پایش کیفی آب دریاچه چاه‌نیمه در استان سیستان و بلوچستان به تغییرات مکانی قابل توجهی دست یافت که یکی از دلایل اصلی این تغییرات عبارت از ورود رسوبات و املاح زیاد رودهای سیلابی ورودی به دریاچه مذکور بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز تالش با مساحت ۳۲۰۰ کیلومترمربع در شمال غرب ایران و با مختصات ۳۷ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۱ دقیقه طول شرقی واقع شده است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه‌های آبخیز تالش

Fig. 1. Location of Talesh carchments

خط‌الرأس حوضه را رشته‌کوه تالش تشکیل می‌دهد که با راستای جنوبی – شمالی از دره سفیدرود در جنوب تا زمین‌های پست مغان در شمال کشیده شده است و در واقع، جداکننده دو استان گیلان و اردبیل از یکدیگر است. در این بین، یک خط شکستگی بزرگ به نام گسل آستارا (گسل تالش) با روند شمالی ـ جنوبی این کوه‌ها را از چاله خزر جدا کرده است. وجود شکستگی‌ها و گسلش‌های متعدد در منطقه عامل مهمی در بروز فرایندهای ژئومورفیک و تغییر چهره ناهمواری‌های بوده است. فرو افتادن حوضه خزر و افزایش ارتفاع نسبی بین قلل کوهستان‌ها و پایکوه‌های ساحلی که ناشی از حضور گسل استارا و شعبات فرعی آن بوده است، علاوه بر ایجاد کوهستان‌هایی نامتقارن، تشدید فرسایش آب‌های روان را نیز به دنبال داشته است. در چنین شرایطی، جریان آب‌ها، دامنه‌های تالش را که مسلط به جلگه ساحلی می‌باشند، عمیقا حفر نموده‌اند (Hajikarimi, Shayan & Khoshraftar, 2020). بلندترین و پست‌ترین نقطه تالش به ترتیب با ارتفاع ۳۲۳۰+ و ۲۰- متر مشخص می‌باشد. دامنه شیب منطقه نیز بسیار متنوع بوده و از صفر تا ۶۸ درجه متغیر است. چنین تنوع و اختلاف توپوگرافی باعث تنوع شرایط زیست‌محیطی در حوضه آبریز تالش شده است. وجود پوشش جنگلی اثر مثبتی در کاهش گل‌آلودگی و بهبود کیفیت آب رودخانه‌ها دارد. وجود رطوبت رسیده از دریای خزر نقش مهمی در پیدایش و حفظ این جنگل‌ها داشته است. به طور کلی، عامل فاصله از دریای خزر نقش تعیین‌کننده‌ای در اقلیم منطقه داشته و بیشترین بارش در نواحی شرقی و جلگه تالش اتفاق می‌افتد. متوسط بارندگی سالانه آستارا برابر با ۱۲۵۰ میلی‌متر و تالش برابر با ۹۱۴ میلی‌متر است.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به لحاظ هدف از نوع کاربردی و از نظر روش توصیفی ـ تحلیلی می‌باشد. منابع کتابخانه‌ای مورد استفاده شامل نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰، مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متر، داده‌های ماهانه کیفیت آب بود. جهت ارزیابی و تعیین شدت و جهت روابط بین متغیرهای ژئومورفومتری و کیفیت آب از روش‌های تحلیل فضایی- آماری از جمله تحلیل همبستگی و رگرسیون استفاده گردید. در این تحقیق دو متغیر کیفی آب شامل کل جامدات محلول (TDS) و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) که در بیشتر تحقیقات مورد استناد بوده‌اند، به عنوان متغیرهای وابسته مدنظر قرار گرفتند. TDS نشان‌دهنده تمامی مواد جامد محلول در آب شامل آنیون‌ها، کاتیون‌ها و مواد آلی و فلزات است. بنابراین تغییرات این پارامتر می‌تواند به عنوان نماد کلی کیفیت آب رودخانه‌ها در یک منطقه به کار برده شود. EC نیز به عنوان نماینده تام نمک‌های حل‌شده در آب مطرح می‌باشد. به عبارتی، سایر عناصر کیفی آب چون فسفات، کلر، سدیم، کلسیم و ... همگی به نوعی با این دو مولفه اصلی کیفیت آب رودخانه‌ها در ارتباط هستند. مراحل کار به شرح زیر بود:

آماده‌سازی و آزمون کفایت آماری داده‌ها

پس از اخذ داده‌های نمونه کیفیت آب ثبت‌شده از سازمان آب منطقه‌ای نسبت به انتخاب ایستگاه‌های دارای آمار کافی و صحیح اقدام شد. بدین ترتیب که ایستگاه‌هایی که با نبود داده‌های آماری در برخی سال‌ها یا ماه‌ها بودند، ناقص تشخیص داده شده و از روند بررسی کنار گذاشته شدند. به‌علاوه، ایستگاه‌های که سری آماری آن‌ها بعضا با داده‌های نامتعارف و ناهمگون با کل داده‌ها مواجه بود یا داده‌های تکراری غیرمنطقی داشتند، به دلیل وجود اشتباهات در اندازه‌گیری یا ثبت آن‌ها حذف شدند. در نهایت، ایستگاه‌های منتخب شامل ۱۲ ایستگاه هیدرومتری بود که مشخصات آن‌ها به ترتیب از سمت شمال به جنوب منطقه در جدول ۱ آورده شده است. سری زمانی مورد استفاده از سال آبی ۱۳۹۱ تا سال آبی ۱۴۰۰ را شامل گردید. قبل از محاسبه میانگین ماهانه TDS (میلی‌گرم بر لیتر) و EC (میکروموس بر سانتی‌متر) برای هر یک از ایستگاه‌های هیدرومتری، لازم بود تا داده‌های پرت و دور از واقعیت حذف شوند که این کار با استفاده از محاسبه نمره استاندارد (z) برای داده‌های نمونه میسر شد. داده‌هایی که نمره استاندارد آن‌ها خارج از بازه ۳± بود، به عنوان داده پرت محسوب شده و از مجموعه داده‌های نمونه کنار گذاشته شد (Rostampour, 2020). پس از این کار نوبت به آزمون ران[1] رسید که جهت آگاهی از تصادفی بودن داده‌های نمونه صورت گرفت. این آزمون یکی از مناسب‌ترین آزمون‌ها برای بررسی شرط تصادفی بودن داده‌هاست. با استفاده از آزمون مشخص می‌شود تا چه حد دنباله‌ای از اعداد به صورت تصادفی گردآوری شده‌اند. بیان فرضیه‌های آماری به صورت زیر است:

فرض صفر : توزیع داده‌ها به صورت تصادفی است.

فرض بدیل : توزیع داده‌ها به صورت تصادفی نیست.

به لحاظ معنی‌داری می‌توان سطح ۰/۰۵ یا ۰/۰۱ را برای این آزمون درنظر گرفت. چنان‌چه معنی‌داری حاصل از اجرای آزمون بزرگ‌تر از سطح معنی‌داری باشد، تصادفی بودن داده‌ها تایید می‌شود. تمامی این محاسبات در محیط نرم‌افزاری SPSS 19.0 صورت گرفت.

1-Run Test

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری و حوضه‌های آبخیز تالش

Table 1- Charchteristics of Talesh hydrometry stations and catchments

نام ایستگاه هیدرومتری Hydrometry Satation	نام رودخانه River	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	ارتفاع ایستگاه هیدرومتری (متر) Altitude of Hyromtry Station	مساحت حوضه (کیلومترمربع) Catchment Area
آب‌ویر بالا Abvirbala	دیناچال Dinachal	37-34-42	49-00-51	130	202/3
اوستاقاسم محله OstaghasemMahaleh	شیرآباد Shirabad	38-06-06	48-54-08	54	64/1
باش‌محله BashMahaleh	لوندویل Lavandvil	38-18-37	48-52-11	38	37/4
بالامحله BalaMahaleh	چوبر Choobar	38-10-54	48-53-36	73	61/9
پونل Poonel	شفارود Shafarood	37-31-47	49-06-05	97	348/6
خان‌حیاطی Khanhayati	چلوند Chelond	38-17-07	48-50-16	25	61/6
خرجگیل Kharjaghil	ناورود Navrood	37-42-41	48-53-44	139	264/8
زرمی Zarmi	لیسار Lisar	37-58-36	48-51-11	150	174/9
صفرمحله SafarMahaleh	حویق Havigh	38-08-24	48-51-37	60	126/8
قربان محله GhorbanMahaleh	لمیرچای Lamirchay	38-13-40	48-50-43	33	51/6
کله‌سرا Kalehsara	خاله‌سرا Khalesara	37-42-08	48-56-17	53	49/2
ماشین‌خانه Mashinkhaneh	کرگانرود Korghanrood	37-47-42	48-50-11	147	528/1

استخراج خصوصیات هندسی یا ژئومورفومتری حوضه‌های آبخیز

حوضه‌های آبخیز مورد مطالعه شامل ۱۲ حوضه با مساحت کلی ۱۹۹۳ کیلومترمربع می‌باشد. محاسبه و تعیین خصوصیات ژئومورفومتری حوضه‌ها با استفاده از قابلیت‌های پردازشی نرم‌افزارهای GIS و SAGA صورت گرفت. پس از آن که استخراج حوضه‌های آبخیز با استفاده از الحاقیه آرک هیدرو و بر مبنای ایستگاه‌های هیدرومتری به عنوان خروجی حوضه صورت گرفت، جمعا ۱۵ متغیر مستقل ژئومورفومتری مورد بررسی قرار گرفت که به غیر از متغیر سنگ‌شناسی، سایر متغیرها همگی از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت ۳۰ متر استخراج گردید. قبل از استخراج حوضه‌ها و متغیرهای ژئومورفومتری از طریق پیش‌پردازش نقاط چاله زائد در سطح DEM نسبت به پر کردن این چاله‌ها و حفظ پیوستگی جریان و ترسیم آبراهه‌ها اقدام شد. خصوصیات ژئومورفومتری حوضه‌ها شامل درصد سازندهای حساس به فرسایش، مساحت، ارتفاع متوسط، شیب متوسط، شیب متوسط آبراهه اصلی، نسبت انشعاب، طول آبراهه‌ها، طول آبراهه اصلی، زمان تمرکز، تراکم زهکشی، ضریب فشردگی، نسبت کشیدگی، متوسط تحدب سطح زمین، متوسط فاکتور طول دامنه (LS)، متوسط شاخص ناهمواری زمین بود.

تحلیل همبستگی

پس از این که از صحت و درستی و همچنین تصادفی بودن داده‌های هیدرومتری کیفیت آب اطمینان حاصل گردید، محاسبه مقادیر میانگین TDS و EC برای ایستگاه‌های مورد نظر از یک طرف و محاسبه مقادیر متغیرهای ژئومورفومتری برای حوضه‌های مورد مطالعه از طرف دییگر انجام شد. در گام بعدی، آزمون همبستگی بین ۱۵ متغیر ژئومورفومتری و ۲ متغیر کیفی آب در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ انجام گرفت. این سطح معنی‌داری در علوم انسانی مورد استعمال بوده و از شرایط سخت‌گیرانه آزمون‌های تجربی پرهیز می‌نماید. به‌علاوه در این‌جا داده‌های هیدرولوژی (کیفیت آب) مورد نظر است که داده‌ای تصادفی محسوب شده و با عدم قطعیت روبرو هستند، بنابراین درنظر گرفتن ۵ درصد احتمال برای پذیرش فرض صفر (عدم وجود روابط معنی‌دار)، منطقی است.

تحلیل رگرسیون چندمتغیره

در تحقیقات رگرسیون چندگانه، هدف، پیدا کردن متغیرهای پیش‌بینی است که تغییرات متغیر ملاک را چه به‌تنهایی و چه به‌صورت مشترک پیش‌بینی کند. پس از انجام آزمون همبستگی و مشخص شدن شدت و جهت رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته، نسبت به گزینش آن دسته از متغیرهای مستقل که از روابط معنی‌دار با متغیرهای وابسته برخوردار بودند، اقدام شد. سپس این متغیرهای مستقل ژئومورفومتری و متغیرهای وابسته TDS و EC تحت آزمون رگرسیونی چندمتغیره واقع شد. در پژوهش حاضر از دو روش جبری و گام به گام جهت انجام آزمون‌های رگرسیونی چندمتغیره در محیط نرم‌افزاری SPSS 19.0 بهره گرفته شد. در روش جبری با توجه به این که تمامی متغیرهای مستقل وارد مدل می‌شوند، ممکن است متغیرهای با تاثیر جزئی و غیرمعنی‌دار در کنار متغیرهای مهم و اصلی حضور یابند. بنابراین نیاز است تا به روش دیگری این متغیرهای فرعی از مدل نهایی حذف شوند. در روش گام به گام، در هر مرحله متغیری که بیشترین ارتباط را با متغیر وابسته دارد، وارد می‌شود و این متغیرها تا جایی ادامه می‌یابد که همه متغیرهایی که می‌توانند برای برآورد متغیر وابسته مفید باشند، وارد مدل می‌شوند. لازم به ذکر است که سطح معنی‌داری روابط رگرسیونی ۰/۰۵ و کمتر درنظر گرفته شد. انتخاب این سطح معنی‌داری به جای سطح ۰/۰۱ به دلیل پذیریش آن در تحقیقات علوم انسانی و نیز امکان استفاده از هر دو روش جبری و گام به گام در تحلیل‌های رگرسیونی است، چه ممکن است روش جبری سطح معنی‌داری ۰/۰۱ یا کمتر را نداشته باشد، ولی این روش مقدمه‌ای برای ورود به روش‌های دقیق‌تر پیش‌بینی است.

نتایج و بحث

آزمون همگنی (کلموگروف-اسمیرنوف)

قبل از انجام همبستگی پیرسون لازم است تا از همگنی داده‌های متغیر وابسته آگاهی پیدا نماییم. این کار از طریق «آزمون کولموگروف-اسمیرنف» صورت می‌گیرد. هدف، آگاهی از این واقعیت است که توزیع داده‌های متغیر وابسته نرمال است یا خیر. نتایج این آزمون در جدول ۲ مشاهده می‌شود. با توجه به این که معنی‌داری حاصل بالای ۰/۰۵ به دست آمده است، بنابراین می‌توان گفت که توزیع متغیر وابسته نرمال بوده و پیش‌شرط ورود به تحلیل‌های همبستگی پیرسون و رگرسیونی برقرار است.

جدول ۲- نتایج آزمون همگنی بر روی داده‌های TDS و EC

Table 2- Results of Homogenity test on TDS and EC dat

متغیر Variable	تعداد نمونه Sample Number	نمره Z Z Score	معنی‌داری (Sig.) Significance
کل جامدات محلول (TDS) Total Dissolved Solids (TDS)	12	0/883	0/417
هدایت الکتریکی (EC) Electrical Conductivity (EC)	12	0/878	0/423

تحلیل همبستگی بین متغیرهای ژئومورفومتری و متغیرهای کیفی آب

نتایج حاصل از تحلیل همبستگی بین متغیرهای ژئومورفومتری و متغیرهای کیفی آب طبق جدول (۳) مشخص شد. به لحاظ روابط معنی‌دار یا غیرمعنی‌دار، نتایج جدول همبستگی نشان می‌دهد که برای هر یک از این متغیرهای وابسته کل جامدات محلول (TDS) و هدایت الکتریکی (EC)، هشت رابطه معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ ≥ برقرار است. متغیرهای مستقلی که از روابط معنی‌دار با متغیرهای وابسته برخوردارند عبارت‌اند از: مساحت حوضه، متوسط ارتفاع، متوسط شیب، طول رودخانه اصلی، طول آبراهه‌ها، نسبت انشعاب، تراکم زهکشی، ضریب گراویلیوس، زمان تمرکز، شاخص ناهمواری. بالاترین ضریب همبستگی در روابط حاصل برابر با ۰/۸۸ حاصل شد که متعلق به روابط متغیرهای طول رودخانه اصلی و زمان تمرکز با متغیرهای TDS و EC می‌باشد. پس از آن، روابط دو متغیر مساحت حوضه و طول آبراهه‌ها با متغیرهای TDS و EC بالاترین ضریب همبستگی (۰/۸۲) را دارا می‌باشد.

در کنار شدت و ضعف روابط بین متغیرهای ژئومورفومتری و کیفیت آب، جهت روابط (مستقیم یا معکوس) آن‌ها در زمینه مدیریت منابع آب و خاک مهم می‌نماید. اولین متغیر مستقل مهم عبارت از مساحت حوضه می‌باشد که به عنوان نماینده تام خصوصیات هندسی حوضه‌های آبخیز روابط مستقیمی با متغیرهای کیفی آب دارد. به عبارتی، با افزایش مساحت حوضه کیفیت آب رودخانه‌ها کاهش می‌یابد. این واقعیت تا حدودی به کاهش پوشش جنگلی حوضه‌های آبخیز تالش با افزایش مساحت آن‌ها برمی‌گردد. با افزایش مساحت حوضه‌ها بر درصد زمین‌های بایر و رخنمون‌های سنگی در معرض فرسایش و نیز زمین‌های کشاورزی افزوده شده و درنتیجه، یون‌های محلول ورودی به رودخانه‌ها افزایش می‌یابد. به‌علاوه، با افزایش مساحت حوضه، تعداد آبراهه‌ها افزایش یافته و درنتیجه، حجم مواد حمل‌شده چه به صورت محلول و چه به صورت جامد افزایش می‌یابد. این موضوع پیش‌تر به صورت رابطه مستقیم مساحت حوضه با میزان آبدهی و رسوبدهی حوضه‌های آبخیز تالش اثبات گردیده است (Poorfarashzadeh, Madadi & Asghari, 2024). رابطه مستقیم طول آبراهه‌ها با متغیرهای کیفی آب نیز به این واقعیت اشاره دارد.

متغیر ارتفاع از سطح دریا به عنوان مهم‌ترین عامل توپوگرافی رابطه مستقیم و نزدیکی با میزان جامدات محلول و هدایت الکتریکی دارد. این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع حوضه‌ها بر میزان جامدات محلول افزوده شده و هدایت الکتریکی که نشانگر املاح نمکی می‌باشد، افزایش می‌یابد. این واقعیت بدین صورت قابل توجیه است که به دلیل تخریب مکانیکی بیشتر در ارتفاعات بالا و نیز ذوب بیشتر برف‌ها در حوضه‌های کوهستانی، شرایط لازم برای هوازدگی بیشتر سنگ‌ها و رهاسازی مواد محلول فراهم می‌شود. به‌علاوه، کاهش پوشش جنگلی در مرتفعات بالای ۲۰۰۰ متری نیز می‌تواند مزید بر علت بوده و باعث افت کیفیت آب رودها گردد. جهت روابط دومین متغیر توپوگرافی یعنی شیب زمین کاملا ناهمسو با متغیر ارتفاع از سطح دریاست. با افزایش شیب زمین در حوضه‌های آبخیز تالش، کیفیت آب رودخانه‌ها ارتقاء می‌یابد. این واقعیت از بسیاری جهات قابل توجیه است. با افزایش شیب زمین شدت تلاطم آب و خودپالایی رودخانه افزایش یافته و آب رقیق‌تر می‌شود. به لحاظ آنتروپوژنیک نیز چنین رابطه‌ای قابل انتظار است، به‌طوری‌که در شیب‌های بالا به دلیل محدودیت دخالت‌های انسانی اعم از کشاورزی، دامداری، صنایع و ... کیفیت آب رودها ارتقاء می‌یابد. این نتیجه تا حدودی با نتایج لیو و همکاران (Liu et al., 2021) همخوانی دارد. ایشان نیز به کاهش مقادیر کیفی آب با افزایش شیب زمین اشاره داشتند.

جدول ۳- نتایج آزمون همبستگی بین متغیرهای ژئومورفومتری و متغیرهای کیفی آب

Table 3- Results of correlation test between geomorphometry variables and water quality variables

متغیر مستقل Independent Variable	آماره‌های آزمون همبستگی Statistics of Correlation Test	متغیر وابسته Dependent Variable	
		کل جامدات محلول (TDS) Total Dissolved Solids (TDS)	هدایت الکتریکی (EC) Electrical Conductivity (EC)
مساحت حوضه Catchment Area	R	0/82	0/81
	Sig.	0/001*	0/001*
متوسط ارتفاع Mean Altitude	R	0/75	0/74
	Sig.	0/005*	0/005*
متوسط شیب Mean Slope	R	- 0/59	- 0/57
	Sig.	0/041*	0/044*
متوسط شیب رودخانه اصلی Mean Slope of Main River	R	0/17	0/16
	Sig.	0/587	0/598
طول رودخانه اصلی Main River Length	R	0/88	0/88
	Sig.	0/000*	0/000*
طول آبراهه‌ها Lengths of streams	R	0/82	0/81
	Sig.	0/001*	0/001*
نسبت انشعاب Bifurcation Ratio	R	- 0/21	- 0/22
	Sig.	0/514	0/511
تراکم زهکشی Drainage Ddensity	R	0/75	0/73
	Sig.	0/005*	0/006*
کشیدگی حوضه Catchment Elongation	R	0/27	0/272
	Sig.	0/386	0/393
ضریب گروایلیوس Gravilius Coefficient	R	0/19	0/19
	Sig.	0/566	0/555
زمان تمرکز Concentration Time	R	0/88	0/87
	Sig.	0/000*	0/000*
متوسط فاکتور طول دامنه Mean Slope Length Factor	R	- 0/38	- 0/37
	Sig.	0/255	0/23
متوسط شاخص ناهمواری Mean Ruggedness Index	R	- 0/61	- 0/6
	Sig.	0/035*	0/038*
متوسط تحدب سطحی Mean Terrain Convexity	R	- 0/5	- 0/5
	Sig.	0/101	0/102

درصد سازندهای حساس به فرسایش Percentage of Erodible Rocks	R	0/5	0/51
	Sig.	0/105	0/101

با توجه به ضرایب همبستگی حاصل شاید بتوان گفت که طول رودخانه اصلی، مهم‌ترین مولفه خطی و هیدروژئومورفیک در تبیین تغییرات مکانی مولفه‌های کیفی آب در حوضه‌های رودخانه‌ای تالش باشد. افزایش این متغیر اثر منفی در کیفیت آب رودخانه-های تالش دارد. این واقعیت دور از انتظار نیست، چرا که هر چه بر طول رودخانه اصلی افزوده می‌شود، عبور رودخانه از محیط‌های مختلف و با تنوع کاربری و پوشش زمین بیشتر شده و ممکن است در معرض ورود آلاینده‌های مختلف قرار گیرد. به‌علاوه، به علت طول زیاد رودخانه‌ها ممکن است تداوم فرایندهای فرسایشی فزونی گرفته و با توجه به شیب قابل‌توجه رودخانه‌های اصلی تالش، انتقال هنگفت مواد محلول به آسانی صورت گیرد. جهت روابط حاصل در خصوص طول رودخانه اصلی در مورد طول کل آبراهه‌ها نیز صادق می‌باشد. تراکم زهکشی یکی از دیگر از خصوصیات ژئومورفومتری موثر در شدت و ضعف رواناب و رسوبدهی حوضه‌های آبخیز می‌باشد. رابطه مستقیمی که بین این متغیر و متغیرهای کیفی آب وجود دارد، بیانگر این واقعیت است که با افزایش میزان تراکم زهکشی از میزان کیفیت آب رودخانه‌ها در خروجی حوضه‌ها کاسته می‌شود. تراکم زهکشی بالا نشانگر زمین‌های نفوذناپذیر و تبدیل سریع‌تر بارش به رواناب و افزایش نرخ فرسایش و رسوبدهی است. بنابراین رابطه حاصل دور از انتظار نیست.

زمان تمرکز نشانگر مدت زمانی است که یک قطره آب در طولانی‌ترین مسیر رودخانه‌پیماید تا خود را به خروجی حوضه برساند. رابطه مثبت حاصل بین این متغیر و متغیرها یکیفی آب قابل انتظار است، چرا که هر چه زمان تمرکز بالا رفته و قله هیدروگراف پهن‌تر می‌شود، حجم بیشتری از مواد محلول در داخل رودخانه انتقال می‌یابد. حوضه‌های کشیده که با زمان تمرکز بالا مشخص می‌باشند، فرصت بیشتری به ته‌نشست و تثبیت مواد محلول در بستر رودخانه و عوارض داخل کانال چون نیمکت‌های شنی می‌دهند. درنتیجه، آلودگی ناشی از تمرکز TDS و EC در رودخانه‌ها افزایش می‌یابد. به‌علاوه، بالا رفتن زمان تمرکز یعنی مدت زمان بیشتر برای یک قطره آب جهت همراه ساختن مواد محلول با خود است.

آخرین گروه از متغیرهای ژئومورفولوژی که روابط آن‌ها با متغیرهای کیفی آب بعد از متغیرهای ارتفاعی و هیدرولوژی مورد بررسی قرار گرفت، متغیرهای ناهمواری بود که نشانگر فعالیت مورفوژنز می‌باشد. شاخص ناهمواری از رابطه معکوسی با متغیرهای کیفی آب برخوردار است. چنین اثر مثبت افزایش ناهمواری زمین در ارتقاء کیفیت آب رودخانه‌ها می‌تواند به دلیل کاهش فشار آنتروپوزنیک و محدودیت فعالیت کشاورزی در محیط‌های ناهموار باشد. به‌علاوه، نقش مهم حفاظتی جنگل در این بین برجسته بوده و عموما پهنه‌های ناهموار از رخداد جنگل‌زدایی در امان می‌مانند. انگلهارت و همکاران (Engelhardt, Weisberg & Chambers, 2011) چنین بیان داشتند که گونه‌های جنگلی در حوضه‌های ناهموار وفور بیشتری نسبت به حوضه‌های کم‌ناهموار دارند.

تحلیل رگرسیونی روابط بین متغیرهای ژئومورفومتری و متغیرهای کیفی آب

ارزیابی برهمکنش‌ها بین متغیرهای محیطی زمانی مفید واقع می‌شود که به یک پیش‌بینی یا برآورد پدیده بینجامد. پیش‌بینی‌ها در صورتی امکان‌پذیر است که بین متغیرهای مورد نظر، ارتباط معنی‌داری وجود داشته باشد. نتایج تحلیل‌های همبستگی نشان داد که از بین ۱۵ متغیر ژئومورفومتری، ۸ متغیر از همبستگی معنی‌داری با متغیرهای کیفی آب برخوردار هستند. بنابراین می‌توان به مدل‌های پیش‌بین از مولفه‌های کیفی آب دست یافت. اما قبل از انجام آزمون رگرسیونی لازم است تا از عدم هم‌خطی بین متغیرهای مستقل کسب اطمینان حاصل شود تا واریاس قابل تبیین متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل دچار افزونگی نشود. اولین گام در این زمینه بررسی ماتریس همبستگی بین متغیرهای مستقل برگزیده است. این ماتریس در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به ارقام حاصل مشخص می‌شود که همبستگی معنی‌داری بین بیشتر متغیرهای مورد بررسی وجود دارد. در این بین، متغیر مساحت

طبق انتظار رابطه بسیاری نزدیکی با بسیاری از متغیرهای دیگر داشته و احتمالا اولین متغیری باشد که در معادلات رگرسیونی پیش‌بین کنار گذاشته می‌شود. در مقابل، متغیر شیب حوضه تنها یک رابطه معنی‌دار با سایر متغیرها داشته و احتمال می‌رود جزو بهترین متغیرهای پیش‌بین مولفه‌های کیفی آب باشد.

جدول ۴- نتایج آزمون همبستگی بین متغیرهای ژئومورفومتری

Table 4- Results of correlation test between geomorphometry variables

		مساحت حوضه Catchment Area	ارتفاع Altitude	شیب Slope	طول رودخانه اصلی Main River Length	طول آبراهه‌ها Lengths of Streams	تراکم زهکشی Drainage Ddensity	زمان تمرکز Concentration Time	شاخص ناهمواری Ruggedness Index
مساحت حوضه Catchment Area	R		0/63	- 0/43	0/85	0/99	0/74	0/85	- 0/44
	Sig.		0/03*	0/17	0/000*	0/000*	0/006	0/000*	0/151
ارتفاع Altitude	R	0/626		- 0/3	0/75	0/63	0/75	0/67	- 0/25
	Sig.	0/03*		0/343	0/005*	0/029*	0/005*	0/017*	0/423
شیب Slope	R	- 0/43	- 0/3		- 0/34	- 0/44	- 0/54	- 0/34	0/99
	Sig.	0/167	0/343		0/282	0/153	0/08	0/275	0/000*
طول رودخانه اصلی Main River Length	R	0/85	0/75	- 0/34		0/84	0/63	0/99	- 0/36
	Sig.	0/000*	0/005*	0/282		0/001*	0/027*	0/000*	0/246
طول آبراهه‌ها Lengths of Streams	R	0/99	0/63	- 0/44	0/84		0/76	0/84	- 0/45
	Sig.	0/000*	0/029*	0/153	0/001*		0/004*	0/001*	0/14
تراکم زهکشی Drainage Ddensity	R	0/74	0/75	- 0/72	0/63	0/76		0/59	- 0/38
	Sig.	0/006*	0/005*	0.009*	0/027*	0/004*		0/045*	0/277
زمان تمرکز Concentration Time	R	0/85	0/67	- 0/34	0/99	0/84	0/59		- 0/38
	Sig.	0/000*	0/017*	0/275	0/000*	0/001*	0/045*		0/227
شاخص ناهمواری Ruggedness Index	R	- 0/44	- 0/25	0/99	- 0/36	- 0/45	0/68	0/38	
	Sig.	0/151	0/423	0/000*	0/246	0/14	0/016*	0/227	

راه‌کار اصولی جهت دست‌یابی به متغیرهای مستقل مهم و اصلی جهت پیش‌بینی متغیر وابسته استفاده از آزمون خطی است. این کار طی فرایند اجرای رگرسیون چندمتغیره انجام می‌شود که در ادامه شرح داده می‌شود.

مدل رگرسیون چندمتغیره کل جامدات محلول

نتایج تحلیل رگرسیونی روابط متغیرهای ژئومورفومتری حوضه (مساحت، ارتفاع، شیب، طول رودخانه اصلی، طول ابراهه‌ها، تراکم زهکشی، زمان تمرکز، شاخص ناهمواری) با متغیر کل جامدات محلول (TDS) به روش جبری در جدول ۵ مشاهده می‌شود. در مدل رگرسیونی حاصل، ۹۸ درصد واریانس متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل قابل توضیح می‌باشد. این مدل معنی‌دار بوده و با توجه به آماره دوربین واتسون شرط عدم همبستگی بین خطاها هم در آن برقرار است.

مدل پیش‌بینی روش جبری به صورت رابطه (۱) ارائه شده است:

$$TDS = -1888/88 + 0/01A + 0/15\ Alt + 75/44\ S - 19/28\ Mrl + 75/80\ Dd + 43/69\ Ct - 131Rug \quad (۱)$$

در معادله فوق، A: مساحت حوضه، Alt: متوسط ارتفاع حوضه، S: متوسط شیب حوضه، Mrl: طول رودخانه اصلی، Dd: تراکم زهکشی، Ct: زمان تمرکز، و Rug: متوسط ناهمواری حوضه می‌باشد. در مدل فوق متغیر مستقل طول آبراهه‌ها به خاطر عامل تورم واریانس (VIF) بالاتر از ۱۰ (VIF= 1381) و هم‌خطی بسیار بالا با سایر متغیرها از مدل نهایی حذف شد.

جدول ۵- آماره‌های مدل رگرسیونی پیش‌بین کل جامدات محلول (TDS) به روش جبری

Table 5- Statistics of predictive regression model of total dissolved solids (TDS) by Enter metod

دوربین واتسون Durbin–Watson	معنی‌داری (Sig.) Significance (Sig.)	آماره F F Statistics	مجموع مربعات باقیمانده (SSE) Sum of Error Squares (SSE)	مجموع مربعات رگرسیون (SSR) Sum of Regresssion Squares (SSR)	خطای استاندارد برآورد (SE) Standard Error of Estimate (SE)	ضریب تعیین (R^2) Coefficient of Determination (R^2)
2/31	0/02	10/37	1104	20040	16/61	0/98

با توجه به وجود همبستگی بین متغیرهای مستقل، نتایج احتمال هم‌خطی بین این متغیرها مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۶). آماره تولرانس عموما بین صفر و یک است که هر قدر به یک نزدیک‌تر باشد، هم‌خطی کمتر است. مقادیر تولرانس حاصل برای بسیاری از متغیرهای مستقل نزدیک به صفر است که نشانگر هم‌خطی نسبتا بالاست. عامل تورم واریانس (VIF) شاخص خوبی از هم‌خطی‌بودن نسبت به تولرانس است. هر چه مقدار VIF یک متغیر مستقل بزرگ‌تر باشد، نشانگر نقش کمتر آن متغیر در تبیین تغییرات متغیر وابسته است. نتایج حاصل موید این مطلب است که به غیر از متغیر مساحت، سایر متغیرهای مستقل از VIF بالای ۱۰ برخوردار بوده و با مشکل هم‌خطی مواجه هستند. بنابراین استفاده از مدل رگرسیونی حاصل با اشکال مواجه بوده و بایستی مدل یا مدل‌هایی ارائه شود که این اشکال در آن‌ها رفع شده باشد.

جدول ۶- آماره‌های همخطی متغیرهای مستقل در مدل رگرسیونی کل جامدات محلول (TDS) به روش جبری

Table 6- Collinearity Statistics of the independent variables in regression model of total dissolved solids (TDS) by Enter metod

آماره هم‌خطی Colinearity Statistics	مساحت حوضه Catchment Area	ارتفاع Altitude	شیب Slope	طول رودخانه اصلی Main River Length	تراکم زهکشی Drainage Ddensity	زمان تمرکز Concentration Time	شاخص ناهمواری Ruggedness Index
تولرانس Tolerance	0/115	0/041	0/002	0/002	0/051	0/002	0/002
عامل تورم واریانس Variance Inflation Factor	8/72	24/46	624/18	603/51	19/47	458/81	559/36

جهت رسیدن به مدل رگرسیونی مناسب و مفید با درنظر گرفتن مفروضات مربوط از روش گام به گام در تحلیل رگرسیونی استفاده شد. این روش یکی از بهترین روش‌ها جهت شناخت مهم‌ترین متغیرهای مستقل پیش‌بین و بدون هم‌خطی است که در عین حال معنی‌داری روابط رگرسیونی را در اولویت قرار می‌دهد. نتایج حاصل از اجرای رگرسیون گام به گام در جدول ۷ مشاهده می‌شود.

دو مدل رگرسیونی در این‌جا قابل ارائه است که در آن‌ها دو متغیر مستقل طول رودخانه اصلی (Mrl) و شیب زمین (S) حضور دارند. در مدل اول با استفاده از تنها متغیر طول رودخانه اصلی (Mrl) ۷۸ درصد واریانس متغیر وابسته قابل توضیح می‌باشد. در مدل دوم ۸۸ درصد واریانس متغیر وابسته توسط دو متغیر طول رودخانه اصلی و شیب زمین قابل توضیح می‌باشد. آماره تولرانس و عامل تورم واریانس برای مدل اول برابر با یک بوده و نشانگر رفع کامل مشکل هم‌خطی از مدل رگرسیونی است. این مقادیر برای مدل دوم به ترتیب برابر با ۰/۸۸۵ و ۱/۱۲۹ حاصل شد که عدم وجود هم‌خطی را تایید می‌نماید. گرچه ضریب تعیین (R^2) مدل رگرسیونی روش گام به گام نسبت به مدل رگرسیونی روش جبری کمتر است، اما مقادیر F و معنی‌داری (Sig) در این زمینه تعیین‌کننده است. آماره F بالا و معنی‌داری کامل مدل رگرسیونی روش گام به گام نسبت به مدل رگرسیونی روش جبری نشانگر کارایی و مفید بودن مدل‌های پیش‌بین روش گام به گام نسبت به مدل رگرسیونی روش جبری است. افزایش آماره F بدان معناست که نسبت مربعات رگرسیون به مربعات باقیمانده یا خطای مدل افزایش یافته و اعتبار مدل بالا می‌رود. حتی آماره دوربین واتسون نیز در مدل رگرسیونی روش گام به گام کمتر شده و به عدد ۱/۵ نزدیک‌تر شده است که احتمال عدم وجود همبستگی بین باقیمانده‌های رگرسیون را بالا می‌برد.

جدول۷- آماره‌های مدل رگرسیونی پیش‌بین کل جامدات محلول (TDS) به روش گام به گام

Table 7- Statistics of predictive regression model of total dissolved solids (TDS) by Stepwise metod

مدل Model	ضریب تعیین (R^2) Coefficient of Determination (R^2)	خطای استاندارد برآورد (SE) Standard Error of Estimate (SE)	مجموع مربعات رگرسیون (SSR) Sum of Regresssion Squares (SSR)	مجموع مربعات باقیمانده (SSE) Sum of Error Squares (SSE)	آماره F F Statistics	معنی‌داری (Sig.) Significance (Sig.)	دوربین واتسون Durbin–Watson
1	0/78	21/76	16410	473	34/66	0/000	
2	0/88	17/18	18519	2625	31/74	0/000	1/95

مدل‌های پیش‌بین روش گام به گام به صورت رابطه‌های (۲ و ۳) قابل ارائه است:

$$TDS = 49/62 + 3/45\ Mrl \quad (۲)$$

$$TDS = 305/4 + 3/1\ Mrl - 9/95\ S \quad (۳)$$

مدل رگرسیون چندمتغیره هدایت الکتریکی

آزمون رگرسیونی روابط بین متغیرهای مستقل ژئومورفومتری و متغیر وابسته هدایت الکتریکی (EC) به دو روش جبری و گام به گام انجام شد. نتایج حاصل از اجرای رگرسیون جبری طبق جدول ۸ نشان می‌دهد که مدل اولیه قادر به توضیح ۹۸ درصد واریانس EC می‌باشد. این مدل در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار بوده و با توجه به آماره دوربین واتسون که پایین‌تر از عدد ۲/۵ می‌باشد، شرط استقلال بین خطاها هم در آن برقرار است.

جدول ۸- آماره‌های مدل رگرسیونی پیش‌بین هدایت الکتریکی (EC) به روش جبری

Table 8- Statistics of predictive regression model of electrical conductivity (EC) by Enter metod

دوربین واتسون Durbin–Watson	معنی‌داری (Sig.) Significance (Sig.)	آماره F F Statistics	مجموع مربعات باقیمانده (SSE) Sum of Error Squares (SSE)	مجموع مربعات رگرسیون (SSR) Sum of Regresssion Squares (SSR)	خطای استاندارد برآورد (SE) Standard Error of Estimate(SE)	ضریب تعیین (R^2) Coefficient of Determination (R^2)
2/32	0/02	10/12	2849	50447	26/69	0/97

مدل پیش‌بین اولیه به صورت رابطه (۴) قابل ارائه است:

$$EC = -1888/88 + 0/01A + 0/15\ Alt + 75/44\ S - 19/28\ Mrl + 75/80\ Dd + 43/69\ Ct - 131Rug \quad (۴)$$

در معادله فوق، A: مساحت حوضه، Alt: متوسط ارتفاع حوضه، S: متوسط شیب حوضه، Mrl: طول رودخانه اصلی، Dd: تراکم زهکشی، Ct: زمان تمرکز، و Rug: متوسط ناهمواری حوضه می‌باشد.

وجود هم‌خطی بین متغیرهای مستقل در مدل رگرسیون روش جبری مربوط به تغییرات EC نیز مورد بررسی واقع شد (جدول ۹). نتایج حاصل نشان می‌دهد که در مدل اولیه رگرسیونی EC نیز هم‌خطی بالایی بین متغیرهای مستقل وجود دارد.

جدول ۹- آماره‌های همخطی متغیرهای مستقل در مدل رگرسیونی هدایت الکتریکی (EC) به روش جبری

Table 9- Statistics of collinearity of independent variables in regression model of electrical conductivity (EC) by Enter metod

آماره هم‌خطی Colinearity Statistics	مساحت حوضه Catchment Area	ارتفاع Altitude	شیب Slope	طول رودخانه اصلی Main River Length	تراکم زهکشی Drainage Ddensity	زمان تمرکز Concentration Time	شاخص ناهمواری Ruggedness Index
تولرانس Tolerance	0/114	0/038	0/002	0/003	0/053	0/002	0/004
عامل تورم واریانس Variance Inflation Factor	8/5	23/12	618/31	588/42	20/23	445/56	510/69

ورود تمامی متغیرهای مستقل به صورت یکجا به مدل باعث بروز تورم واریانس و عدم برآورد واقعی متغیر وابسته شده است. بنابراین استفاده از مدل رگرسیونی حاصل با اشکال مواجه می‌باشد. بنابراین نیاز به روش‌هایی است که متغیرهای اضافی و دارایی واریانس زائد را از مدل حذف نماید. به مانند متغیر وابسته TDS در مورد متغیروابسته EC نیز از روش گام به گام جهت رسیدن به یک مدل رگرسیونی مناسب و مفید جهت پیش‌بینی متغیر وابسته EC استفاده شد. نتایج حاصل از اجرای رگرسیون گام به گام در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود. دو مدل رگرسیونی در این‌جا قابل ارائه است. مدل اول قادر به توضیح ۷۷ درصد واریانس EC با استفاده از متغیر طول رودخانه اصلی است. در مدل دوم ۸۷ درصد واریانس متغیر وابسته توسط دو متغیر طول رودخانه اصلی و شیب زمین قابل توضیح می‌باشد. طی این دو مدل، آماره‌های هم‌خطی بسیار بهبود یافته و مشکل هم‌خطی کاملا رفع گردیده است.

برای مدل اول میزان تولرانس و عامل تورم واریانس برابر با یک می‌باشد. این مقادیر برای مدل دوم به ترتیب برابر با ۰/۸۸۱ و ۱/۱۲۲ حاصل شد که عدم وجود هم‌خطی را تایید می‌نماید. با توجه به ارتقاء آماره F و معنی‌داری این دو مدل نسبت به مدل روش جبری، می‌توان گفت مدل‌های رگرسیونی روش گام به گام از کارایی و و اعتبار خوبی جهت برآورد مکانی EC در حوضه‌های آبخیز تالش برخوردارند.

جدول ۱۰- آماره‌های مدل رگرسیونی پیش‌بین هدایت الکتریکی (EC) به روش گام به گام

Table 10- Statistics of predictive regression model of electrical conductivity (EC) by Stepwise metod

دوربین واتسون Durbin–Watson	معنی‌داری (Sig.) Significance (Sig.)	آماره F F Statistics	مجموع مربعات باقیمانده (SSE) Sum of Error Squares (SSE)	مجموع مربعات رگرسیون (SSR) Sum of Regresssion Squares (SSR)	خطای استاندارد برآورد (SE) Standard Error of Estimate (SE)	ضریب تعیین (R^2) Coefficient of Determination (R^2)	مدل Model
	0/000	34/66	11823	41473	34/38	0/77	1
1/91	0/000	35/16	6655	46641	27/19	0/87	2

مدل‌های رگرسیونی پیش‌بین EC به روش گام به گام به صورت رابطه‌های (۵ و ۶) می‌باشد:

$$EC = 77/04 + 5/58\ Mrl \quad (۵)$$

$$EC = 488/43 + 3/1\ Mrl - 15/57\ S \quad (۶)$$

یکی از اهداف مهم انجام تحلیل‌های همبستگی و رگرسیونی همانا شناسایی مهم‌ترین متغیرهای مستقل موثر بر تغییرات متغیر وابسته است. نتایج تحلیل‌های همبستگی نشان می‌دهد که ترتیب اهمیت متغیرهای ژئومورفومتری در تبیین تغییرات مکانی TDS و EC بدین صورت می‌باشد: طول رودخانه اصلی، زمان تمرکز، شاخص ناهمواری، شیب، ارتفاع، تراکم زهکشی، مساحت. اما معیار نهایی برای انتخاب متغیرهای مستقل مهم، مدل‌های رگرسیونی نهایی است که مشکل هم‌خطی متغیرهای مستقل در آن‌ها رفع شده است. اولین متغیر مستقل مهم که اثر قاطعی بر تغییرات مکانی کیفیت آب رودخانه‌های تالش دارد، عبارت از طول رودخانه اصلی است که یک متغیر خطی و هیدروژئومورفیک محسوب می‌شود. رابطه مستقیم بین متغیر طول رودخانه اصلی و متغیرهای TDS و EC می‌تواند در راستای نتایج عادلی (Adeli, 2012) باشد. وی اذعان داشت که هر چه مسیر طی‌شده آب بیشتر باشد، احتمال کاهش کیفیت آب بالاتر است. آلمادا و همکاران (Almada et al., 2019) نیز طول رود و شیب حوضه را در زمره مهم‌ترین پیش‌بین‌گرهای کیفیت آب دانستند. دومین متغیر مستقل مهم که در مدل‌های نهایی پیش‌بین حضور داشت متغیر شیب زمین می‌باشد که بیشتر محققین به اهمیت مثبت آن در افزایش کیفیت آب رودخانه‌ها اذعان داشتند. وجود رابطه معکوس بین این متغیر و متغیرهای کیفی آب دال بر نقش مثبت شیب زمین در توان خودپالایی رودخانه بوده و در راستای نتایج لیو و همکاران (Liu et al., 2021) و گوانانگا و همکاران (Guananga et al., 2022) می‌باشد.

با توجه به نقش برجسته خصوصیات هیدروژئومورفیک در تغییرات مکانی کیفیت آب رودخانه‌ها می‌توان نتایج حاصل را با نتایج رضائی مقدم و همکاران (Rezaei Moghaddam et al., 2017) نیز هم‌راستا دانست. با وجود این‌ها، بیشتر محققین به نقش اساسی عامل زمین‌شناسی در تغییرات کیفیت آب رودخانه‌ها اشاره کرده‌اند. وارانکا و همکاران (Varanka et al., 2015) در کنار عامل توپوگرافی به عامل مهم سنگ‌شناسی در تغییرات کیفی آب اذعان داشت. یمانی و همکاران (Yamani et al., 2010) شیب رودخانه و جنس بستر را جزو عوامل ژئومورفیک موثر بر کیفیت آب قلمداد نمودند. در نهایت عادلی (Adeli, 2012) و جباری (Jabari, 2014)

نیز به نقش قاطع جنس سنگ‌بستر در تغییرات مکانی کیفیت آب اذعان داشتند. عدم ورود عامل سنگ‌شناسی به مدل‌های نهایی برآورد کیفی آب را می‌توان به دلایل چندی دانست. گرچه این محققین به نقش برجسته سازند زمین‌شناسی در تغییرات مکانی مولفه‌های کیفی آب پی بردند، لیکن نتایج ایشان بیشتر کیفی بوده و بر اساس تحلیل همبستگی نبوده است. به عبارتی، ایشان از عامل سنگ‌شناسی به صورت متغیر اسمی یا رتبه‌ای در تعیین تغییرات کیفیت آب رودخانه‌ها بهره جستند. از طرفی، گسترش کم سازندهای حساس به فرسایش در حوضه‌های آبخیز تالش می‌تواند توجیهی بر اهمیت کم این متغیر نسبت به متغیرهای ژئومورفومتری در قبال تغییرات کیفی آب رودخانه‌ها باشد. البته وجود پوشش حفاظی جنگل نیز مزید بر علت شده و مانع از فرسودگی سنگ‌های دامنه‌ها و انحلال مواد قابل حمل به داخل رودخانه‌های تالش می‌شود. در عین حال، هر چند رابطه قوی و معنی‌داری بین درصد سازندهای حساس به فرسایش و متغیرهای کیفی آب در حوضه‌های آبخیز تالش حاصل نشد، لیکن جهت رابطه حاصل بین این متغیر و متغیرهای کیفی آب (مستقیم) در راستای نتایج تحقیقات پیشین بود. به عبارتی، سازندهای حساس به فرسایش نقش موثری در افزایش میزان TDS و EC در حوضه‌های رودخانه‌ای تالش دارند. تاناکا و سوزوکی (Tanaka & Suzuki, 2009) بیان داشتند هرچند عوامل اصلی که کیفیت آب رودها را تحت تاثیر قرار می‌دهند، زمین‌شناسی و ته‌نشست جوی بر روی حوضه می‌باشد، اما کیفیت آب رودها تغییرات چشمگیری حتی در حوضه‌های با زمین‌شناسی و بارندگی‌های جوی یکسان نشان می‌دهد. این نشان می‌دهد به غیر از این عوامل، عامل دیگری که ارتباط نزدیکی با کیفیت آب رود دارد، تاثیرگذار است. این عامل می‌تواند همان عامل ژئومورفیک باشد که تعیین‌کننده تغییرات مکانی تمامی مواد قابل حمل رودخانه‌هاست.

نتیجه‌گیری

از آن‌جایی که خصوصیات حوضه آبخیز به طرق پیچیده با یکدیگر و نیز با عوامل کاربری زمین در کنش متقابل هستند، فهم اثرات آن‌ها بر کیفیت آب می‌تواند راهگشای پیش‌بینی تغییرات کیفی آب در حوضه‌های رودخانه‌ای باشد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که با تکیه بر داده‌های رقومی ارتفاعی و مدل‌های آماری رگرسیونی می‌توان به راحتی به این مهم دست یافت که برای برنامه‌ریزان و طراحان صنعت آب جهت تامین مصارف مختلف شهری و روستای و صنعتی مفید می‌باشد. نتایج تحلیل همبستگی از این نظر حائز اهمیت است که روابط معنی‌دار و متغیرهای مستقل موثر بر تغییرات مکانی مولفه‌های کیفی آب را برایمان آشکار می‌سازد. در این راستا با توجه به جهت روابط همبسته (مستقیم یا معکوس) بین متغیرهای ژئومورفومتری و متغیرهای کیفی TDS و EC در حوضه‌های آبخی تالش می‌توان پهنه‌های حساس در برابر افت کیفی آب رودخانه‌ها را شناساییی نمود که جهت اولویت‌بندی عملیات ابخیزداری و حفاظت و احیاء حوضه‌های آبخیز مهم می‌نماید. نتایج تحلیل‌های همبستگی نشان می‌دهد که در حوضه‌های بزرگ، مرتفع، کم‌شیب و هموار، گرد و دارای رودهای طویل، تراکم زهکشی بالا، و زمان تمرکز زیاد، کیفیت آب رو به افول می‌گذارد. فلذا چنین حوضه‌هایی نیازمند حفاظت بیشتر در قبال بهره‌برداری از منابع آب و خاک هستند. اهمیت این موضوع با توجه به مورفودینامیک فعال حوضه‌های آبخیز تالش و بروز فرایندهای فرسایش و سیل در آن‌ها هرچه بیشتر معلوم می‌شود.

استفاده از روش‌های جبری و گام به گام در مدل‌سازی روابط بین متغیرهای ژئومورفومتری و متغیرهای کیفی آب (TDS و EC) این مزیت را دارد که پروسه انتخاب متغیرهای پیش‌بین اصلی به طور کامل و با بررسی پیش‌فرض‌های آماری قابل انجام است. به‌علاوه، اعمال روش جبری با دخیل کردن تمامی روابط همبسته معنی‌دار نشان داد که از منظر ژئومورفومتری حوضه، قادر به شناسایی ترکیب درهم‌بافته متغیرهای خطی، مسطحاتی و ناهمواری و نقش آن در تغییرات مکانی متغیرهای کیفی آب رودخانه‌ها می‌باشد که به نوبه خود دلالت بر ماهیت سیستمی حوضه زهکشی و روابط ستیغ- دامنه- کانال دارد. با این حال، مدل‌های پیش‌بین معتبر و دقیق و نیز دست‌یابی به قطعیت تاثیر متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته از طریق اعمال روش گام به گام میسر می‌باشد. در مدل اول این روش با استفاده از تنها متغیر طول رودخانه اصلی و در مدل دوم با استفاده از دو متغیر طول رودخانه اصلی و شیب

زمین به ترتیب ۷۸ و ۸۸ درصد واریانس متغیرهای TDS و EC قابل توضیح بود که رقم قابل توجهی است. چنین نتیجه گرفته شد که هر چه بر طول رودخانه اصلی افزوده می‌شود، عبور رودخانه از محیط‌های مختلف و با تنوع کاربری و پوشش زمین بیشتر شده و ممکن است در معرض ورود آلاینده‌های مختلف قرار گیرد. به‌علاوه، به علت طول زیاد رودخانه‌ها ممکن است تداوم فرایندهای فرسایشی فزونی گرفته و با توجه به شیب قابل‌توجه رودخانه‌های اصلی تالش، انتقال هنگفت مواد محلول به آسانی صورت گیرد.
در کل، با توجه به توان پیش‌بینی و کارایی بالای مدل‌های رگرسیونی برآورد TDS و EC می‌توان به تعمیم تغییرات مکانی مولفه‌های کیفی آب در سایر حوضه‌های تالش دست زد. در این راستا استفاده از متغیر سنگ‌شناسی به صورت درصد پراکنش سازند و نیز دخیل کردن سایر متغیرهای زمین‌شناسی چون پراکنش گسل‌ها و حساسیت لرزه‌زایی و ... در بررسی تغییرات کیفی آب رودخانه‌ها برای تحقیقات آتی توصیه می‌شود. به‌علاوه، مدل روش جبری به دلیل وجود اشکال هم‌خطی بین متغیرهای مستقل با تورم واریانس و افزونگی اطلاعات مواجه بوده و برای مطالعات کابردی توصیه نمی‌شود.

سپاسگزاری

این اثر تحت حمایت مادی و معنوی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته از طرح شماره ۴۰۲۳۹۷۵ انجام شده است. فلذا از این صندوق و مسئولین آن قدردانی و تشکر می‌شود.

References

Adeli, M. (2012). Evaluation of ground water quality in GORGAN Township using GIS and Geostatistics. *Geographical Planning of Space*, *2*(5), 57-74. [In Persian] https://gps.gu.ac.ir/article_5338.html

Allan, D. (1995). *Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters*. In M. Ebrahimnezhad (Eds.), Esfahan: Esfahan UIniversity Publication.

Almada, H. K. S., Silvério, D. V., Macedo, M. N., Maracahipes-Santos, L., Zaratim, E. C. P., Zaratim, K. P., ... & Umetsu, R. K. (2019). Effects of geomorphology and land use on stream water quality in southeastern Amazonia. *Hydrological Sciences Journal*, *64*(5), 620-632. https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1587563

Amir Entekhabi, S. (2019). Investigating the effects of housing development in land use change (Case study: Talesh). *Spatial Locational Researches*, *3*(1), 69-84. [In Persian]

Dai, X., Zhou, Y., Ma, W., & Zhou, L. (2017). Influence of spatial variation in land-use patterns and topography on water quality of the rivers inflowing to Fuxian Lake, a large deep lake in the plateau of southwestern China. *Ecological Engineering*, *99*, 417-428. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.011

Delbari, F., Rezaei Tavabe, K., Mirvaghefi, A., Lahijanzadeh, A., Bagherzadeh Karimi, M., & Salamroodi, E. (2022). Evaluation of water quality of Tajan River using IRWQIsc index. *Aquaculture Sciences*, *10*(2), 83-98. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23225351.1401.10.19.8.8

Engelhardt, B. M., Weisberg, P. J., & Chambers, J. C. (2011). Influences of watershed geomorphology on extent and composition of riparian vegetation. *Vegetation Science*, *23*(1), 127-139. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2011.01328.x

Farkhani, S. (2021). Investigating the quality status of Haraz River using numerical modeling. *Iran-Water Resources Research*, *17*(1), 262-276. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1400.17.1.16.7

Garcia, J. H., Ollero, A., Ibisate, A., Fuller, I. C., Death, R. G., & Piégay, H. (2021). Promoting fluvial geomorphology to "live with rivers" in the Anthropocene Era. *Geomorphology*, *380*, 107649. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107649

Ghanbarzadeh, H., & Behniafar, A. (2014). *Faundamentals of Environmental Changes*. Mashhad: Sokhanghostar Publication. [In Persian]

Guananga, N., Mendoza, B., Guananga, F., Bejar, J., Carbonel, C., Escobar Arrieta, S. N., & Guerrero Rivera, A. W. (2022). Influence of geomorphology and flow on the water quality of Guano river, Ecuador. *Revista Digital Novasinergia*, *5*(2), 174-192. https://doi.org/10.37135/ns.01.10.10

Hajikarimi, Z., Shayan, S., & Khoshraftar, R. (2020). Assessment of Active tectonics in the Karganroud Basin in the eastern slope of the Talesh (Baghrodagh), by Using Geomorphic Indices. *Quantitative Geomorphological Research*, *9*(1), 217-236. [In Persian] https://www.geomorphologyjournal.ir/article_109989.html

Homayoonnezhad, I., & Amirian, P. (2024). Water quality assessment, water quality index, wqi, chahnimeh reservoirs. *Journal of Water and Sustainable Development*, *10*(4), 81-88. https://doi.org/10.22067/jwsd.v10i4.2307-1262

Jabbari, I. (2014). The role of geological and geomorphologic characteristics on the Sirvan river pollution. *Geography and Environmental Sustainability*, *4*(3), 27-42. [In Persian] https://ges.razi.ac.ir/article_242.html?lang=en

Kkhalili, R., Parvinnia, M., & Zali, A. (2020). Water quality assessment of Garmarood River using the national sanitation foundation water quality index (NSFWQI), river pollution index (RPI) and weighted arithmetic water quality index (WAWQI). *Environment and Water Engineering*, *6*(3), 274-284. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jewe.2020.238090.1381

Liu, H., Meng, C., Wang, Y., Li, Y., Li, Y., & Wu, J. (2021). From landscape perspective to determine joint effect of land use, soil, and topography on seasonal stream water quality in subtropical agricultural catchments. *Science of the Total Environment*, *783*, 147047. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147047

Mahrooyan, F., Taghavi, L., Sarai Tabrizi, M., Babazadeh, H. (2020). Water quality assessment of Qazvin River using NSFWQI index for water quality classification. *Journal of Wetland Ecobiology*, *12*(1), 99-112. [In Persian] http://jweb.ahvaz.iau.ir/article-1-855-en.html

Montaseri, L., Amir Ahmadi, A., Zangeneh Asadi, M. A. (2019). Geomorphologic phenomenon of marly hills and its effect on chemical quality of the agricultural water (case study: Kalateh-Sadat watershed of Sabzevar). *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, *19*(55), 57-77. [In Persian] http://dx.doi.org/10.29252/jgs.19.55.57

Mousavian, M., Haghizadeh, A., Dehdari, S., & Hazbavi, Z. (2014). Affective environmental factors on temporal variations of water quality properties in Zard River in khuzistan province. *Iranian Journal of Ecohydrology*, *1*(1), 59-68. [In Persian] https://doi.org/10.22059/ije.2014.52526

Murray, A. B., Lazarus, E., Ashton, A., Baas, A., Coico, G., Coulthard, T., … & Reinhardt, L. (2009). Geomorphology, complexity, and the emerging science of the Earth's surface. *Geomorphology*, *103*, 496-505. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.013

Poorfarashzadeh, F., Madadi, A., & Asghari, S. (2024). The investigation of relationship between forest cover and hydrogeomorphic variables in Talesh catchments. *Quantitative Geomorphological Research*, *13*(3), 46-64. [In Persian] https://www.geomorphologyjournal.ir/article_198370.html

Rezaei Moghaddam, M. H., Nikjoo, M. R., Hejazi, M. A., Khezri, S., & Kazemi, A. (2017). Study of the effects of hydro-geomorphology factors on the water quality changes of Siminehrood River at various stations during 2003-2013. *Iranian Journal of Ecohydrology*, *4*(2), 395-405. [In Persian] https://doi.org/10.22059/ije.2017.61476

Rostampour, M. (2022). Comparison of outlier detection methods and their impact on rangeland measurement and assessment studies. *Journal of Range and Watershed Managment*, *75*(4), 639-660. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.50442008.1401.75.4.9.9

Shakeri Zare, H., Karam, A., Saffari, A., & Kiyani, T. (2020). Assessment of environmental flow needs of harirud border riverbed after construction and dewatering of salma dam in Afghanistan (by hydrological methods). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *9*(2), 207-224. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geo.v9i2.85447

Tanaka, M., & Suzuki, K. (2009). Influence of watershed topography on the chemistry of stream water in a mountainous area. *Water, Air, and Soil Pollution*, *196*, 321-331. https://doi.org/10.1007/s11270-008-9780-2

Varanka, S., Hjort, J., & Luoto, M. (2015). Geomorphological factors predict water quality in boreal rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, *40*(15), 1989-1999. https://doi.org/10.1002/esp.3601

Yamani, M., Moghimi, E., Jodari-E-Eyvazi, J., Mohamadi, H., & Issaee, A. R. (2010). Effects of Ecogeomorphological Parameters on Chemical Water Quality Case Study: Kor River and Doroodzan Dam Lake. *Geography and Environmental Planning*, *21*(1), 17-32. [In Persian] https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20085362.1389.21.1.2.6

Ye, L., Cai, Q. H., Liu, R. Q., & Cao, M. (2009). The influence of topography and land use on water quality of Xiangxi River in Three Gorges Reservoir region. *Environmental Geology*, *58*(5), 937-942. https://doi.org/10.1007/s00254-008-1573-9

Zia -Tavana, M. H., & Amir Entekhabi, S. (2007). Procedure of conversion in village to city and its results in Talesh Township. *Geography and Development*, *5*(10), 107-128. [In Persian] https://doi.org/10.22111/gdij.2007.3663

(Research Journal)

VOLUME 14, NO 54, SUMMER 2025

CONTENTS

Analysis of the Spatial Position of the Subtropical Jet Stream and Synoptic Conditions Influencing Extreme Wet Years in Northeast of Iran **1**

Homa Dorostkar Golkhaili; hassan lashkari; Zainab Mohammadi

Evaluation of the Efficiency of Multi-Layer Perceptron Neural Network in Predicting Dust Storms at some Stations on the Persian Gulf Coast (Abadan, Ahvaz and Bushehr) **21**

Fatemeh Vatanparast Galeh Juq; Bromand Salahi

Synoptic-Satellite Analysis of Dust in Kurdistan Province **45**

Seyed Asaad Hosseini; Mehdi Rahnama; Hamid Bagheri; Ali Panahi; Bahram Charehkhah; Khabat Ghamari; Noushin Khoddam; Faezeh Noori; Saviz Sehat Kashani

Detection of Climate Change Impacts on Precipitation and Temperature Parameters in the Kabul River Basin, Afghanistan Using the LARS-WG08 Model **68**

Abdul Aziz Qazizada; Kamal Omidvar; Gholam Ali Mozaffari; Ahmad Mazidi

Assessing the Risks of Climate Change on Wetland Ecosystems Using the GCM Model (Case Study: Alagol, Ajigol and Almagol Wetlands, Golestan Province) **88**

Saleh Arekhi; Abolghasem Mamshli; Abdulhafiz Panahi

Calculating the Urban Thermal Field Variance Index and Classifying Thermal Comfort Based on Land Surface Temperature (Case Study: Sari City) **122**

Kaka Shahedi; Arman Kiani; Salah Mohammadi Sarvaleh

Investigating and Identifying of Suitable Point for Installing Low-Cost Sensors in IoT Monitoring of Urban Air Pollution **145**

Masoud Ebrahimi Ghadu; Ahmad Nohegar; Zeinab Sazvar; Mahmoud Behrouzi

Evaluation of Drought Risk and Its Consequences for the Sustainability of Rural Tourism: A Case Study of Torshiz **173**

Fahimeh Jafari; khadijeh Bouzarjomehri; Hasan Faraji Sabokbar; Hamdollah Sojasi Qeydari

The Impact of Empowering Rural Women on Achieving Sustainable Development and Environmental Conservation (A Synthesis Study) **199**

Mahtab Moosavi; Amir Ali Borouamand; Fatemeh Tabatabaei Yazdi

Investigating the Role of Landforms in Soil Erosion Rates Using the RUSLE Model and GEE System, Case Study: Basins of the Southern Slope of the Sahand Mountain Massif **223**

Mousa Abedini; Aboozar Sadeghi; Aghil Madadi

Analysis of the Relationship Between Landslide Susceptibility and the Intensity of Soil Erosion and Sediment Yield (Case Study: Darabkola Watershed, Mazandaran Province) **245**

Samaneh Yousefi; Eisa Jokar Sarhangi; Reza Esmaili

Analyzing the Eustatic and Geostatic Changes in the Stability of the Caspian Coastal Plain (Case Study: Chalus) **266**

Mohammad Fathollahzadeh; Mojtaba Yamani; Abolghasem Goorabi; Mehran Maghsudi; Mehrnoosh Ghadimi

Investigating the Displacement of the Earth's Surface Caused by Earthquakes Using Radar Interferometry (Case Study: Ilam Province, Mountain Frontal Fault) **287**

Zahra Kalmishi; Iman Rosta; Rahman Zandi

Analyzing the Trend of Land Use Changes in the Past and Future in Zolachay Watershed **308**

Tayebeh Irani; Hirad Abghari; Ali Akbar Rasooli

Modeling the Spatial Variations of Water Quality Components Using Geomoerphometry Variables (Case Study: Talesh River Catchments) **329**

Fahimeh Pourfarrashzadeh; Aghil Madadi; Mortaza Gharachorlu

Editor-in-Chief: Dr. S. R. Hosseinzadeh

Department of Geography Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Director: **Dr. S. R. 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

International Editorial Board:

Professor Victor R. Baker
Department of Hydrology and Water Resource, University of Arizona, USA
Professor Ziyadin Çakir
Department of Geology, Istanbul Technical University, Turkey
Professor 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
Professor 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
Dr. Manijeh Ghahroudi Tali
Department of Geography, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
Dr. Alireza Karimi
Department of Soil Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Dr.Golamreza Lashkaripour
Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Dr. Abolfazl Masudian
Department of Physical Geography, University of Isfahan, Isfahan, Iran
Dr. Masoud Minaei
Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Dr. Masoud Mirzaei Shahrabi
Department of Chemistry, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Dr. Hossein Mohammadzadeh
Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Dr. Alireza Rashki
Department of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Dr. Hossein Shafizadeh-Moghadam
Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
Dr. Shaban Shataee Joybari
Department of Forest Sciences, University of Gorgan, Gorgan, Iran
Dr. Kkalil ValizadehKamran
Department of Remote Sensing and GIS, Tabriz University, Tabriz, Iran
Dr. Mojtaba Yamani
Department of Physical Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
Dr. Azar Zarrin
Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Geography and Environmental Hazards (ISSN:2322-1682) is published four times a year in June, September, December and March by Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
Postal Code: 9177948883, Tel: +98(0) 5138805273 Fax: +98(0) 51 38794144
E-mail: geo.eh@um.ac.ir Website : http://geoeh.um.ac.ir

Aims

Geography and Environmental Hazards is an interdisciplinary Iranian research journal that highlights geographical themes such as the degree of geographical hazard in various regions, human exposure to risk, vulnerability, public awareness, disaster response, and planning strategies to mitigate the impacts of environmental hazards.
The journal also addresses the role of hazards in influencing development processes, particularly in developing countries, and engages with issues related to efficiency, social equity, and sustainability.

Scopes

The journal welcomes high-quality original research articles, review papers, short communications, case studies, methodological contributions, and applied research on the following topics:

- **Geological and Geomorphological Hazards**: Earthquakes, soil liquefaction, volcanic eruptions, lahars, tsunamis, land subsidence, landslides, lateral spreading, debris flows, rockfalls, mudflows, avalanches, soil piping, and related processes.
- **Hydrological -geomorphological Hazards**: Riverine floods, urban inundation, sea-level fluctuations, coastal erosion, water erosion, wind erosion, dune migration, salt weathering, saline water intrusion, desertification, and soil salinization.
- **Climatic and Atmospheric Hazards**: Climate change, dust storms, haboobs, firestorms, blizzards, tornadoes, extreme weather events, droughts, severe frosts, heatwaves, fog, lightning, cosmic radiation, and ultraviolet exposure.
- **Bio-physical and Biological Hazards**: Natural wildfires, agricultural frosts, allergies, viral outbreaks, food poisoning, epidemics, chronic diseases (e.g., cancer), plant pests and diseases, and insect infestations.
- **Technological Hazards**: Air, soil, and water pollution, industrial contamination, chemical hazards, noise pollution, nuclear radiation, electronic waste, radioactive waste, dam failures, transport accidents, fires, chemical spills, and anthropogenic construction hazards.
- **Socio-cultural Hazards**: Mental health crises, aggression, stress and depression, ethnic and social conflicts, theft, drug addiction, conventional and hybrid warfare, political unrest, border disputes, high-risk behaviors, and urban–rural vulnerabilities.
- **Environmental Hazard Management**: Crisis management, active and passive risk management, emergency response and rescue, post-disaster recovery, and strategic planning for hazard mitigation.

Guide for Authors

The ***Journal of Geography and Environmental Hazards*** accepts articles exclusively on topics related to environmental hazards (both natural and human-induced) due to its specialized nature. Articles must represent the original research of the author(s) and should not have been previously published in any domestic or international journals, conference proceedings, or submitted simultaneously to another journal.

Article Submission Process

Online Submission System:

The *Journal of Geography and Environmental Hazards* processes only articles submitted through its official website: https://geoeh.um.ac.ir/author

Language and Style:
Articles are accepted in Persian with an extended abstract in English.

Types of Articles

- Original research articles
- Review articles
- Short communications
- Technical notes or methodological articles
- Case studies

Note:

- Articles presented at conferences may be considered if they include significant revisions and additional content.
- Review articles that cover recent advancements in the journal's topics will only be accepted from experienced authors with relevant research publications.

Article Preparation

For detailed information on the structure of each section of the article, click here.

Conflict of Interest and Commitment Forms:
Authors must upload these forms during article submission.

Conflict of interest Form
Authorship statement Form

Formatting Requirements

The article structure should include:

1. Extended abstract in English (comprising *Introduction* (Purpose, literature review, etc.), *Materials and Methods*, *Results and Discussion*, *Conclusion*),
2. Title, abstract, and keywords,
3. Main sections: *Introduction*, *Study Area*, *Materials and Methods*, *Results and Discussion*, *Conclusion*, and *References*.

Important: For accuracy, both Persian and English versions of the extended abstract must be submitted.

Word Count Limits:

- Main article text: 3,000–7,000 words
- Extended English abstract: 700–1,500 words
- Keywords: 3–5 words
- References: 20–50 for research articles; 50–300 for review articles

Formatting Guidelines

- Articles should be submitted in A4 format, single-column, and without logos.
- All pages must be numbered, and the article length (excluding tables and figures) must not exceed 15 pages.
- Margins: 3.5 cm (top and bottom), 3 cm (left and right).
- Line spacing: 1.5 (5 lines).
- Footnotes must restart numbering on each page.
- Main and subheadings should not be numbered.
- Numerical data in the text must be in Persian numerals, except within tables and figures.
- Figure captions (below) and table titles (above) should be bilingual (Persian and English).
- In-text citations and references must be in English (parentheses in Persian font).
- Use half-spaces throughout the text.
- Numbered or bulleted lists should have a 0.5 cm indent before the text.

Font

- Persian text: B Nazanin
- English text: Times New Roman
- Font sizes:
    - Persian and English titles: 16, 14(bold)
    - Main headings: 12 (bold)
    - Body text: 12
    - Latin text: 10
    - Scientific names: Italic
    - Captions for figures and tables: 11 (Persian), 10 (English)
    - Table and figure numbers: Bold

Tables

- Submit tables in editable text format, not as images.
- Place tables near their related text or in a separate section at the end.
- Number tables sequentially based on their appearance in the text.
- Provide bilingual titles (Persian: B Nazanin, 11, Bold; English: Times New Roman, 10, Bold).
- Data in Persian tables must include English equivalents.
- Avoid vertical lines and shading in table cells.

Figures and Images

- Submit figures/images as separate files and reference them in the text.
- Number figures/images sequentially as they appear.
- Titles for figures/images must be bilingual (below the figure: Persian, B Nazanin, 11; English, Times New Roman, 10).

Mathematical Equations

- Present equations in two-column invisible tables.
- Number equations sequentially, enclosed in parentheses.
- Use Times New Roman, font size 10, for equations.

Units of Measurement

- Follow the SI (metric) system.
- Use exponential notation (e.g., m s^{-1} instead of m/s).

References

- Use the 6th edition of the APA citation style. Tools like EndNote or Word are recommended.
- In-text citations and the reference list must be in English.
- For Persian sources, provide English bibliographic details from official pages or sites and indicate [In Persian].
- Ensure all citations include DOI if available.
- Follow alphabetical order for author names in the reference list.

Publication Fees

The ***Journal of Geography and Environmental Hazards*** does not charge for the initial review. However, accepted articles must pay a fee of 6 million Rials for editing and publication costs.

Promoting Published Articles

- Share your article on platforms like ResearchGate, Academia.edu, and Mendeley.
- Create an ORCID ID and link your article to your profile.
- Promote your article on social media using relevant hashtags.
- Cite the article in your presentations and share slides on platforms like SlideShare.
- Share your article's DOI link with colleagues and in your email signature.
- Share your slides related to the article on platforms such as SlideShare.
  Send your article to colleagues, researchers, and relevant research groups via email, and include the article's DOI link in your email signature.

CONTENTS

Analysis of the Spatial Position of the Subtropical Jet Stream and Synoptic Conditions Influencing Extreme Wet Years in Northeast of Iran **1**

Homa Dorostkar Golkhaili; hassan lashkari; Zainab Mohammadi

Evaluation of the Efficiency of Multi-Layer Perceptron Neural Network in Predicting Dust Storms at some Stations on the Persian Gulf Coast (Abadan, Ahvaz and Bushehr) **21**

Fatemeh Vatanparast Galeh Juq; Bromand Salahi

Synoptic-Satellite Analysis of Dust in Kurdistan Province **45**

Seyed Asaad Hosseini; Mehdi Rahnama; Hamid Bagheri; Ali Panahi; Bahram Charehkhah; Khabat Ghamari; Noushin Khoddam; Faezeh Noori; Saviz Sehat Kashani

Detection of Climate Change Impacts on Precipitation and Temperature Parameters in the Kabul River Basin, Afghanistan Using the LARS-WG08 Model **68**

Abdul Aziz Qazizada; Kamal Omidvar; Gholam Ali Mozaffari; Ahmad Mazidi

Assessing the Risks of Climate Change on Wetland Ecosystems Using the GCM Model (Case Study: Alagol, Ajigol and Almagol Wetlands, Golestan Province) **88**

Saleh Arekhi; Abolghasem Mamshli; Abdulhafiz Panahi

Calculating the Urban Thermal Field Variance Index and Classifying Thermal Comfort Based on Land Surface Temperature (Case Study: Sari City) **122**

Kaka Shahedi; Arman Kiani; Salah Mohammadi Sarvaleh

Investigating and Identifying of Suitable Point for Installing Low-Cost Sensors in IoT Monitoring of Urban Air Pollution **145**

Masoud Ebrahimi Ghadu; Ahmad Nohegar; Zeinab Sazvar; Mahmoud Behrouzi

Evaluation of Drought Risk and Its Consequences for the Sustainability of Rural Tourism: A Case Study of Torshiz **173**

Fahimeh Jafari; khadijeh Bouzarjomehri; Hasan Faraji Sabokbar; Hamdollah Sojasi Qeydari

The Impact of Empowering Rural Women on Achieving Sustainable Development and Environmental Conservation (A Synthesis Study) **199**

Mahtab Moosavi; Amir Ali Borouamand; Fatemeh Tabatabaei Yazdi

Investigating the Role of Landforms in Soil Erosion Rates Using the RUSLE Model and GEE System, Case Study: Basins of the Southern Slope of the Sahand Mountain Massif **223**

Mousa Abedini; Aboozar Sadeghi; Aghil Madadi

Analysis of the Relationship Between Landslide Susceptibility and the Intensity of Soil Erosion and Sediment Yield (Case Study: Darabkola Watershed, Mazandaran Province) **245**

Samaneh Yousefi; Eisa Jokar Sarhangi; Reza Esmaili

Analyzing the Eustatic and Geostatic Changes in the Stability of the Caspian Coastal Plain (Case Study: Chalus) **266**

Mohammad Fathollahzadeh; Mojtaba Yamani; Abolghasem Goorabi; Mehran Maghsudi; Mehrnoosh Ghadimi

Investigating the Displacement of the Earth's Surface Caused by Earthquakes Using Radar Interferometry (Case Study: Ilam Province, Mountain Frontal Fault) **287**

Zahra Kalmishi; Iman Rosta; Rahman Zandi

Analyzing the Trend of Land Use Changes in the Past and Future in Zolachay Watershed **308**

Tayebeh Irani; Hirad Abghari; Ámir Akbar Rasooli

Modeling the Spatial Variations of Water Quality Components Using Geomoerphometry Variables (Case Study: Talesh River Catchments) **329**

Fahimeh Pourfarrashzadeh; Aghil Madadi; Mortaza Gharachorlu

Ferdowsi University of Mashhad

Vol.14, No. 2, Summer 2025

Journal of Geography and Environmental Hazards

Research Journal



Published by: Ferdowsi University of Mashhad ISSN: 2322-1682