

مجله



جغرافیا و مخاطرات محیطی

(نشریه علمی)

سال چهاردهم، شماره ۱، پیاپی ۵۳، بهار ۱۴۰۴، چاپ: ۳۰۷۶-۲۳۸۳

• پیش‌نمایی بارش و دمای حوزه آبخیز قره‌سو با تأکید بر عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی
گل‌اله غفاری، علی سلاجقه

• تحلیل مکانی فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌ها بر مبنای الگوی کاربری اراضی در منطقه سیستان
محمدامین ایزدی‌پور، رضا دهمرده بهروز، فاطمه عین‌اللهی پیر، فاطمه رجائی

• شناسایی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش در جاده آستارا تا تونل نمین با استفاده از مدل MLP
فریبا اسفندیاری درآباد، مهرداد وهاب‌زاده، زهره شیخ‌لر، بهروز نظافت تکه

• تأثیر کاربری اراضی بر قابلیت جذب فلزات سنگین و آلودگی محیطی خاک
ابراهیم محمودآبادی، مرتضی اکبری، فریدون سرمیدیان

• ارزیابی توان لرزه‌خیزی گسل هرات در غرب افغانستان بر پایه فراسنج‌های لرزه‌زمین‌ساختی و نرخ گشتاور لرزه‌ای
امین محمدی، سعید زارعی

• تحلیل آسیب‌پذیری زیرساخت‌های روبنایی در برابر سیل با تأکید بر روش AHP Fuzzy (مورد مطالعه: شهر خرم‌آباد)
امیر رحیمی، مهین نسترن

• ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی نیمه‌توزیعی (SWAT) و یکپارچه (SMAR) در برآورد و شبیه‌سازی بارش...
محمدحسین رضایی مقدم، فریبا کرمی، کلثوم اباذری

• بفراکاوی و مرور سیستماتیک ادغام داده‌های عمق نوری آئروسول بر گرفته از ماهواره با یادگیری ماشین در...
رسول طاهریان اصفهانی، مهدی قنبرزاده لک

• بررسی تغییرپذیری رگبارها با استفاده از روش گورجی (مطالعه موردی: ایستگاه‌های منتخب استان مازندران)
ساینا وکیلی آذر، یعقوب دین‌پژوه، سعید جهانبخش اصل

• برآورد میزان فرسایش و رسوب حوضه آبریز زمینکان در استان کرمانشاه با تأکید بر متغیرهای تأثیرگذار
شهرام روستایی، سید اسداله حجازی، هدیه شیرزادی

• پایش فرونشست در حریم خطوط ریلی با الگوریتم LiCSBAS و روش تداخل سنجی راداری...
سروش یاسینی، حسین اعتمادفر

• ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش و تعیین عوامل مؤثر در وقوع آن با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی...
علی گیلانی‌پور، صدرالدین متولی، خه بات درفشی

• ارزیابی ارتباط بین شاخص کیفیت خاک و تغییرات کربن آلی تحت تأثیر کاربری‌های مختلف...
سولماز بی‌دست، احمد گلچین

• بررسی تأثیر افزایش سطح زیرکشت و رشد جمعیت بر منابع آب سطحی حوضه آبخیز سد مهاباد با استفاده از مدل WEAP
نظام‌الدین محمودی، هیراد عبقری

• طراحی و مدلسازی ژئومورفیک در بازسازی سایت‌های معدنی (مطالعه موردی: معدن سنگ آهن سنگان)
مهوش نداف سنگانی، سید رضا حسین‌زاده، خوزه فرانسیسکو مارتین داک، مهناز جهادی‌طرقی





فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی (نشریه علمی)

سال چهاردهم ، شماره پنجاه و سوم ، بهار ۱۴۰۴

شاپا الکترونیکی: ۳۰۷۶-۲۳۸۳

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۱۶۸۲

- پیش‌نمایی بارش و دمای حوزه آبخیز قره‌سو با تأکید بر عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی گلاله غفاری، علی سلاجقه
- تحلیل مکانی فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌ها بر مبنای الگوی کاربری اراضی در منطقه سیستان محمدامین ایزدی‌پور، رضا دهمرده بهروز، فاطمه عین‌اللهی پیر، فاطمه رجائی
- شناسایی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش در جاده آستارا تا تونل نمین با استفاده از مدل MLP فریبا اسفندیاری درآباد، مهرداد وهاب‌زاده، زهره شیختر، بهروز نظافت‌نکله
- تاثیر کاربری اراضی بر قابلیت جذب فلزات سنگین و آلودگی محیطی خاک ابراهیم محمودآبادی، مرتضی اکبری، فریدون سرمدیان
- ارزیابی توان لرزه‌خیزی گسل هرات در غرب افغانستان بر پایه فراسنج‌های لرزه‌زمین‌ساختی و نرخ گشتاور لرزه‌ای امین محمدی، سعید زارعی
- تحلیل آسیب‌پذیری زیرساخت‌های روبنایی در برابر سیل با تأکید بر روش AHP Fuzzy (مورد مطالعه: شهر خرم‌آباد) امیر رحیمی، مهین نسترن
- ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی نیمه‌توزیعی (SWAT) و یکپارچه (SMAR) در برآورد و شبیه‌سازی بارش-رواناب، مطالعه موردی: حوضه آبریز اوجان‌چای محمدحسین رضایی مقدم، فریبا کریمی، کلثوم اباذری
- فراکاو و مرور سیستماتیک ادغام داده‌های عمق نوری آنروسل برگرفته از ماهواره با یادگیری ماشین در برآورد غلظت ذرات معلق ریز ($PM_{2.5}$) رسول طاهریان اصفهانی، مهدی قنبرزاده لک
- بررسی تغییرپذیری رگبارها با استفاده از روش گورجی (مطالعه موردی: ایستگاه‌های منتخب استان مازندران) سائنا وکیلی آذر، یعقوب دین‌پژوه، سعید جهانیش اصل
- برآورد میزان فرسایش و رسوب حوضه آبریز زیمکان در استان کرمانشاه با تأکید بر متغیرهای تأثیرگذار شهرام روستایی، سید اسداله حجازی، هدیه شیرزادی
- پایش فرونشست در حریم خطوط ریلی با الگوریتم LiCSBAS و روش تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: راه آهن مشهد-سرخس) سروش یاسینی، حسین اعتمادفر
- ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش و تعیین عوامل مؤثر در وقوع آن با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گلندرد) علی گیلاتی پور، صدراالدین متولی، خه بات درفشی
- ارزیابی ارتباط بین شاخص کیفیت خاک و تغییرات کربن آلی تحت تأثیر کاربری‌های مختلف (مطالعه موردی: منطقه سه‌سند استان آذربایجان شرقی) سولماز بی‌دست، احمد گلچین
- بررسی تأثیر افزایش سطح زیر کشت و رشد جمعیت بر منابع آب سطحی حوضه آبخیز سد مها‌باد با استفاده از مدل WEAP نظام‌الدین محمودی، هیراد عبقری
- طراحی و مدل‌سازی ژئومورفیک در بازسازی سایت‌های معدنی (مطالعه موردی: معدن سنگ آهن سنگان) مهوش نداف سنگانی، سید رضا حسین‌زاده، خوزه فرانسیسکو مارتین داک، مهناز جهادی‌طرقی



دانشگاه تهران

دانشکده ادبیات و علوم انسانی

فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول: دکتر سیدرضا حسین زاده

سرمدیر: دکتر سیدرضا حسین زاده

هیئت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

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
خلیل ولیزاده کامران - استاد، گروه سنجش از راه دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه تبریز
احمد نوحه گر - استاد گروه برنامه ریزی مدیریت و آموزش محیط زیست دانشگاه تهران
مجتبی یمانی - استاد جغرافیا - ژئومورفولوژی گروه جغرافیا طبیعی دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران

Prof. Victor R. Baker (Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona)
Prof. Ziyadin Çakır (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 دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

حسین شفیع زاده مقدم - دانشیار مهندسی و مدیریت آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

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

بر اساس آئین نامه کمیسیون نشریات وزارت علوم تحقیقات و فناوری از سال ۱۳۹۸، کلیه نشریات دارای درجه "علمی -

پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند.

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

مدیر داخلی: دکتر مسعود رحیمی کارشناس اجرایی: سید محمد علی موسوی ویراستاری انگلیسی: مریم محمدی شاندریز
 ویراستاری ادبی: دکتر جواد میزبان حروف نگاری و صفحه آرایی: نفیسه اسماعیلی طراحی جلد: امیراسفندیار عامل محرابی

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

نشانی: مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی، کد پستی ۹۱۷۹۴۸۸۳

http://geoeh.um.ac.ir

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

نشانی اینترنتی:

شماره پروانه: ۱۶/۲۷۱۱-۳- این مجله در نشست کمیسیون بررسی نشریات علمی کشور مورخ ۱۳۹۰/۱۲/۱۰، رتبه علمی - پژوهشی دریافت کرده است.

این مجله در پایگاههای زیر نمایه می شود:

پایگاه استادی علوم جهان اسلام (ISC)

پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)

• پایگاه بانک اطلاعات نشریات کشور (Magiran)

• DOAJ (Directory of Open Access Journals)

• EBSCO Information Services

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی

(نشریه علمی)

سال چهاردهم، شماره پنجاه و سوم، بهار ۱۴۰۴

شاپا چاپی: ۱۶۸۲-۲۳۲۲

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۳۰۷۶

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 می باشد. مقاله ها باید حاصل کار پژوهشی نویسنده (یا نویسندگان) باشند و قبلاً در نشریه دیگری اعم از داخلی و خارجی و یا مجموعه مقالات همایش ها به چاپ نرسیده باشند و همچنین به طور همزمان برای نشریه دیگری نیز ارسال نشده باشند.

نحوه دریافت مقاله ها:

سیستم ارسال آنلاین: نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی تنها مقالاتی را در دستور کار قرار می دهد 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 مبسوط انگلیسی می باشد.

انواع مقالات:

- مقالات پژوهشی اصلی.

- مروری.

- مقالات کوتاه.

- یادداشت های فنی یا مقالات روش شناسی.

- مطالعات موردی.

تبصره:

مقاله های ارایه شده در همایش ها و مجامع علمی مشروط به اینکه با تغییرات قابل توجه و افزودن مطالب جدید همراه باشد، قابل بررسی خواهد بود.

مقاله های مروری که پیشرفت های جدید در موضوعات نشریه را در بر می گیرد، از نویسندگان مجرب و دارای مقالات پژوهشی در زمینه مورد نظر پذیرفته می شود.

آماده سازی مقاله

برای دریافت اطلاعات تکمیلی در خصوص نحوه نگارش بخش های مختلف مقاله نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی [اینجا](#) کلیک کنید.

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

الزامات قالب بندی:

ساختار مقاله شامل بخش های 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 روش ها، نتایج و بحث، نتیجه گیری، منابع
نکته مهم: به منظور بررسی دقیق صحت چکیده مبسوط انگلیسی، حتماً هم متن فارسی و هم انگلیسی چکیده مبسوط ارسال شود.

محدودیت های تعداد کلمات :

متن اصل مقاله : ۳۰۰۰ تا ۷۰۰۰ کلمه

چکیده مبسوط انگلیسی : ۷۰۰ تا ۱۵۰۰ کلمه

کلمات کلیدی: حداقل ۳ و حداکثر ۶ عدد

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

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

متن مقاله روی کاغذ A4 بدون هر گونه آرم و نشان و به صورت تک‌ستونه ارسال شود.

کلیه صفحات مقاله باید دارای شماره بوده و تعداد صفحات مقاله پس از حذف جداول و شکل‌ها از ۱۵ صفحه تجاوز نکند. حاشیه صفحه‌ها از بالا ۳/۵، از پایین ۳/۵، از راست و چپ ۳ سانتی‌متر باشد و فاصله سطرها ۱/۵ (۵ lines) تنظیم شود.

پاورقی در هر صفحه به صورت مستقل با شماره‌گذاری از یک آغاز شود.

تیترهای اصلی و فرعی شماره نداشته باشند.

تمام اعداد و ارقام در متن فارسی باشد و در صورت اعشاری بودن اعداد، ممیز به صورت (/) نوشته شود (اعداد فقط در جدول‌ها و شکل‌ها به انگلیسی است).

توضیح شکل‌ها (زیرنویس) و توضیح جدول‌ها (بالانویس) به دو زبان فارسی و انگلیسی باشد (در فارسی و انگلیسی مطابق هم باشند).

استاندهای درون متنی و منابع انتهای مقاله به زبان انگلیسی باشند (کلیه پرانتهای باز و بسته استندهای درون متنی با فونت فارسی باشد).

در کل متن، نیم‌فاصله‌ها رعایت شود.

فهرست‌های عددی یا بولتی (تویی خالی) نیم‌سانتی‌متر قبل از متن تورفتگی بخورد.

عنوان هر بخش یا زیربخش، با یک سطر خالی فاصله از انتهای متن بخش قبلی تایپ شود. در متن مقاله از شماره‌گذاری عنوان‌ها خودداری فرمایید.

فونت:

کلیه کلمات فارسی مقاله با قلم فارسی B Nazanin نوشته شود.

کلیه کلمات انگلیسی مقاله با قلم Times New Roman نوشته شود.

عنوان فارسی و انگلیسی مقاله با اندازه ۱۴ نوشته شود.

عنوان‌های اصلی با اندازه ۱۳ توپر (Bold) نوشته شود.

متن مقاله با اندازه ۱۳ تایپ شود.

کلمات لاتین داخل متن با اندازه ۱۲ نوشته شود.

تمامی اسامی علمی به صورت ایتالیک درج شوند.

عناوین شکل‌ها و جدول‌ها به دو صورت فارسی و انگلیسی به ترتیب با اندازه ۱۲ و ۱۱ نوشته شود.

شماره جدول و شکل به صورت توپر (Bold) بوده و کلیه شکل‌ها و جدول‌ها بدون کادر باشند.

عناوین محورها در همه نمودارها و یا شکل‌ها یکسان و اندازه قلم آن‌ها از ۸ کوچکتر و از ۱۱ بزرگتر نباشد.

پاورقی در هر صفحه به صورت مستقل با شماره‌گذاری از یک آغاز شود و فونت آن برای زبان فارسی B Nazanin، 10 و زبان انگلیسی Times New Roman، 10.

راهنمایی برای شفافیت و اختصار:

از حروف اختصاری بیش از حد استفاده نشود

وقتی حروف اختصاری برای اولین بار در یک متن به کار می‌روند، شکل کامل آن را درج کنید

چنانچه در چکیده و هم در کل مقاله از یک عبارت اختصاری استفاده کرده اید، 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 آن‌ها 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 سلول های 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 جدول های مورد استفاده از منابع دیگر، ارجاع درون و برون متنی ضروری می باشد.
عنوان جدول ها بایستی بالای جدول وسط چین، B Nazanin 12 Bold و متن داخل جدول B Nazanin 11 باشد.
برای تمامی اطلاعات نوشته شده به زبان فارسی در داخل جداول در همانجا معادل انگلیسی هم ذکر گردد.
عنوان انگلیسی جدول ها نیز بایستی در زیر عنوان فارسی آن ها وسط چین، Times New Roman 12 Bold باشد.

شکل ها و تصاویر:

شکل ها، تصاویر و ... باید به صورت فایل های جداگانه همراه با متن اصلی ارائه شوند.
به شکل ها 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 1، Fig.2 ارسال شود.
در شکل های مورد استفاده از منابع دیگر، ارجاع درون و برون متنی ضروری می باشد
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 شکل ها نیز بایستی در زیر آن ها درج شود.

فرمول ها و روابط ریاضی

برای نمایش روابط و فرمول های ریاضی از جدول دو ستونی با خطوط نامرئی استفاده شود.
تمام روابط ریاضی به ترتیب از 1 شماره گذاری شوند و شماره هر رابطه با پرانتز جدا می شود.
روابط باید با اندازه فونت 11 و قلم Times New Roman باشد.

واحدهای اندازه گیری

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

منابع

شیوه نامه ای که باید در نوشتن منابع مورد استفاده قرار گیرد شیوه نامه انجمن روانشناسی آمریکا (APA) نسخه 6 است.
می توان برای افزایش بهره وری و راحتی در این کار از نرم افزار WORD یا EndNote استفاده کرد. تعداد منابع مورد استفاده در مقاله بایستی برای مقالات پژوهشی بین 20 تا 50 و برای مقالات مروری بین 50 تا 300 منبع باشد.
استناد به منبع در متن مقاله (استندهای درون متنی) و همچنین منابع انتهایی مقاله (برون متنی) باید به انگلیسی نوشته شود و سال نشر نیز سال میلادی باشد.

اگر در مقاله از منبع فارسی استفاده شده باشد، باید اطلاعات منبع به زبان انگلیسی برگردانده شود.
اگر منبع مورد استفاده در مقاله، فارسی باشد؛ برای تبدیل اطلاعات کتابشناختی آن به انگلیسی، باید تمام اطلاعات آن (مانند نام نویسنده (نویسندگان)، عنوان منبع (نام نشریه، کتاب، گزارش، پایان نامه) و سایر اطلاعات مورد نیاز) از صفحه عنوان انگلیسی یا سایت اینترنتی منبع گرفته شود. از ترجمه شخصی اطلاعات منابع فارسی خودداری نمایید.
برای استناد به منابعی که نسخه آنلاین دارند، به صفحه انگلیسی سایت منبع مراجعه کنید.
تمامی ارجاعات داخل متن باید به منبع مربوطه لینک شوند.
از ذکر منابع بی نام و غیرقابل دسترس خودداری شود.
منابع بر اساس حروف الفبای نام نویسندگان آورده می شود.

در منابع انتهایی مقاله، نام همه نویسندگان ذکر شود و از آوردن عبارت et al. و others به جای آوردن نام سایر نویسندگان منبع، خودداری شود.

نام منبع (نشریه، کتاب و غیره) و ناشر مخفف نباشد و به طور کامل آورده شود.
برای استناد به مقاله‌هایی که هنوز منتشر نشده‌اند، به جای سال نشر از (In press) استفاده شود.
برای مقاله منتشرشده در نشریه، آوردن شماره نشریه (Issue) و شماره جلد الزامی است (طبق نمونه)، در صورتی که در اصل مقاله به شماره نشریه اشاره نشده است، 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 چهار 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

۱. صیاد اصغری سراسکانرود (استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل،)
۲. ابوالقاسم امیراحمدی (استاد ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری)
۳. علیرضا انتظار، (دانشیار جغرافیای طبیعی - اقلیم شناسی دانشگاه حکیم سبزواری)
۴. لیلی ایزدی کیان، (استادیار زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان)
۵. ابوالفضل بهنیا، (دانشیار گروه جغرافیا، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد)
۶. مهرداد چراغی (استاد محیط زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان)
۷. محسن حمیدیان پور، (دانشیار جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان)
۸. محمود خسروی، (استاد اقلیم شناسی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان)
۹. عباسعلی داداشی رودباری، (استادیار جغرافیای طبیعی - اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد)
۱۰. سولماز دشتی (دانشیار دانشکده دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی اهواز)
۱۱. محمد صادق دهقانپان (دانشیار گروه زمین شناسی، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس)
۱۲. رضا دوستان (دانشیار جغرافیای طبیعی - اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد)
۱۳. مسعود رحیمی (استادیار ژئومورفولوژی - مدیریت محیطی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد)
۱۴. محسن رضائی عارفی (استادیار گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران)
۱۵. مهدی عالی جان (دکتری اقلیم شناسی، دانشگاه محقق اردبیلی)
۱۶. حسین عساکره (استاد اقلیم شناسی، دانشگاه زنجان،)
۱۷. علیرضا کریمی کارویه (استاد خاکشناسی - پیدایش ورده بندی خاک گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد)
۱۸. ندا محسنی (دانشیار جغرافیای طبیعی - ژئومورفولوژی گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه فردوسی مشهد)
۱۹. عقیل مددی (استاد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی دانشگاه محقق اردبیلی)
۲۰. ابوالفضل مساعدی (استاد مهندسی عمران (هیدرولیک) گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد)
۲۱. رئوف مصطفی زاده (دانشیار گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی)
۲۲. غلامرضا مقامی مقیم (دانشیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان)
۲۳. رضا منصوری (استادیار رشته ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه سیستان و بلوچستان)
۲۴. مسعود مینائی (دانشیار جغرافیا - سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد)
۲۵. سعید نگهبان (دانشیار جغرافیای طبیعی - ژئومورفولوژی گروه جغرافیا، دانشگاه شیراز)
۲۶. فریبا همتی (عضو هیات علمی گروه آموزشی جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران)
۲۷. خلیل ولیزاده کامران (استاد دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی دانشگاه تبریز)
۲۸. مجتبی یمانی (استاد ژئومورفولوژی گروه جغرافیا طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران)

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
۱	• پیش‌نمایی بارش و دمای حوزه آبخیز قره‌سو با تأکید بر عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی گل‌اله غفاری، علی سلاجقه
۲۲	• تحلیل مکانی فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌ها بر مبنای الگوی کاربری اراضی در منطقه سیستان محمدامین ایزدی‌پور، رضا دهمرده بهروز، فاطمه عین‌اللهی پیر، فاطمه رجائی
۴۳	• شناسایی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش در جاده آستارا تا تونل نمین با استفاده از مدل MLP فریبا اسفندیاری درآباد، مهرداد وهاب‌زاده، زهره شیخ‌لر، بهروز نظافت تکه
۶۱	• تاثیر کاربری اراضی بر قابلیت جذب فلزات سنگین و آلودگی محیطی خاک ابراهیم محمودآبادی، مرتضی اکبری، فریدون سرمدیان
۷۹	• ارزیابی توان لرزه‌خیزی گسل هرات در غرب افغانستان بر پایه فراسنج‌های لرزه‌زمین‌ساختی و نرخ گشتاور لرزه‌ای امین محمدی، سعید زارعی
۹۹	• تحلیل آسیب‌پذیری زیرساخت‌های روبنایی در برابر سیل با تأکید بر روش AHP Fuzzy ... امیر رحیمی، مهین نسترن
۱۲۳	• ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی نیمه‌توزیعی (SWAT) و یکپارچه (SMAR) در برآورد و ... محمدحسین رضایی مقدم، فریبا کرمی، کلثوم اباذری
۱۵۱	• بفرآکاو و مرور سیستماتیک ادغام داده‌های عمق نوری آئروسول برگرفته از ماهواره با یادگیری ... رسول طاهریان اصفهانی، مهدی قنبرزاده لک
۱۸۷	• بررسی تغییرپذیری رگبارها با استفاده از روش گورجی (مطالعه موردی: ایستگاه‌های منتخب استان مازندران) ساینا وکیلی آذر، یعقوب دین پژوه، سعید جهانبخش اصل
۲۱۰	• برآورد میزان فرسایش و رسوب حوضه آبریز زیمکان در استان کرمانشاه با تأکید بر متغیرهای تاثیرگذار شهرام روستایی، سید اسداله حجازی، هدیه شیرزادی
۲۲۷	• پایش فرونشست در حریم خطوط ریلی با الگوریتم LiCSBAS و روش تداخل سنجی راداری... سروش یاسینی، حسین اعتمادفر
۲۴۷	• ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش و تعیین عوامل مؤثر در وقوع آن با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی ... علی گیلانی پور، صدرالدین متولی، خه بات درفشی
۲۷۵	• ارزیابی ارتباط بین شاخص کیفیت خاک و تغییرات کربن آلی تحت تأثیر کاربری‌های مختلف... سولماز بی‌دست، احمد گلچین
۲۹۹	• بررسی تأثیر افزایش سطح زیرکشت و رشد جمعیت بر منابع آب سطحی حوضه آبخیز سد مهاباد با ... نظام الدین محمودی، هیراد عبقری
۳۲۵	• طراحی و مدل‌سازی ژئومورفیک در بازسازی سایت‌های معدنی (مطالعه موردی: معدن سنگ آهن سنگان) مهوش نداف سنگانی، سید رضا حسین زاده، خوزه فرانسیسکو مارتین داک، مهناز جهادی طرقي



بسمه تعالی

توافقنامه همکاری علمی

این توافقنامه فی مابین مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی و انجمن کواترنری ایران و به منظور همکاری در ادامه انتشار نشریه علمی با عنوان جغرافیا و مخاطرات محیطی در زمینه بررسی مخاطرات محیطی منعقد می گردد.

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

ماده ۲- امور علمی نشریه را هیأت تحریریه که حداقل یک چهارم اعضای آن از اعضای انجمن هستند انجام خواهند داد. تبصره ۱: انجمن متعهد می شود که حداقل دو نفر از اعضای هیأت تحریریه را از اعضای هیأت علمی دانشگاه ها انتخاب نماید. تبصره ۲: یکی از اعضای هیأت تحریریه عضو دانشگاه فردوسی مشهد با پیشنهاد بالاترین مقام صاحب امتیاز و تأیید هیأت مدیره انجمن به عنوان سردبیر نشریه تعیین و با حکم بالاترین مقام صاحب امتیاز به این سمت منصوب خواهد شد. انتخاب سردبیر و اعضای هیأت تحریریه مطابق با آیین نامه تعیین اعتبار نشریات علمی کشور صورت خواهد پذیرفت.

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

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

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

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

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

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

دکتر احمد رضا بهرامی
معاون پژوهشی و فن آوری دانشگاه فردوسی مشهد

دکتر احمد رضا بهرامی
معاون پژوهشی و فن آوری
دانشگاه فردوسی مشهد



دکتر فریبرز قریب
رئیس هیأت مدیره انجمن کواترنری ایران

دکتر فریبرز قریب
رئیس هیأت مدیره انجمن کواترنری ایران



توافقنامه همکاری علمی

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

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

ماده ۲: امور علمی نشریه را هیأت تحریریه، که حداقل یک چهارم اعضای آن از بین اعضای انجمن هستند، انجام خواهند داد. تبصره ۱: انجمن متعهد می‌شود که لااقل دو نفر از اعضای هیأت تحریریه را از اعضای فعال هیأت علمی دانشگاهها انتخاب نماید. تبصره ۲: یکی از اعضای هیأت تحریریه عضو دانشگاه فردوسی با پیشنهاد بالاترین مقام صاحب امتیاز و تأیید هیأت مدیره انجمن به عنوان سردبیر نشریه تعیین و با حکم بالاترین مقام صاحب امتیاز به این سمت منصوب خواهد شد. انتخاب سردبیر و اعضای هیأت تحریریه مطابق با آیین‌نامه تعیین اعتبار نشریات علمی کشور صورت خواهد پذیرفت.

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

ماده ۴: روی جلد مجله علاوه بر نشان دانشگاه فردوسی مشهد نشان انجمن ایرانی ژئومورفولوژی با اندازه یکسان نیز چاپ خواهد شد. ماده ۵: در صفحه حقوقی تمامی شماره‌های نشریه، این جمله آورده شود «این نشریه حاصل فعالیت مشترک دانشگاه فردوسی مشهد و انجمن ایرانی ژئومورفولوژی است».

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

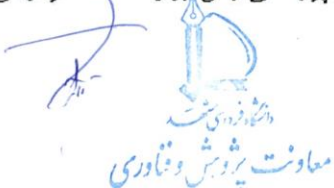
ماده ۷: هزینه‌های لیتوگرافی و چاپ نشریه (فیلم و زینگ، کاغذ، چاپ نشریه و جلد، صحافی) به صورت مشترک و با سهم مساوی توسط انجمن و موسسه متقاضی پرداخت خواهد شد.

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

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

دکتر احمدرضا بهرامی

معاون پژوهشی و فن‌آوری دانشگاه فردوسی مشهد



دکتر مجتبی یمانی

رئیس هیأت مدیره انجمن ایرانی ژئومورفولوژی



معاونت پژوهش و فناوری



Forecasting Precipitation and Temperature in the Qareh-Sou Watershed: Emphasizing Model Uncertainties

 
Golale Ghaffari^{a*}, Ali Salajegh^b

^aAssistant Professor of Soil Conservation and Watershed Management, Research and Education Center for Agriculture and Natural Resources of Kermanshah Province, Kermanshah, Iran

^b Professor of Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 03 January 2024

Received in revised form
20 June 2024

Accepted: 09 October 2024

Available online:
21 March 2025

KEYWORDS:

Climate Model
Ensembles,
Uncertainty
Quantification,
Rcp4.5 Scenario,
Downscaling
Uncertainty, Multi-
Model Ensembles
(MMES), Nash-
Sutcliffe
Efficiency (NSE)

ABSTRACT

As part of the discussion on climate change, one of the most significant sources of uncertainty is the use of different Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCMs), which produce varying outputs for climatic variables. The general consensus is that employing multiple AOGCM models or ensemble methods (Ensemble Projection, EP) for weather forecasting—to account for uncertainty—is a strategy to mitigate the uncertainties associated with AOGCMs. These uncertainties arise from structural differences between global climate models and variations in initial conditions.

For this study, synoptic station data from the Kermanshah Meteorological Organization (spanning January 1, 1993, to December 31, 2016) and downscaled data from 21 AOGCM models (obtained from NASA's NEX-GDDP dataset) were analyzed. The goal was to assess AOGCM model uncertainty for the past period (1976–2005) and the future period (2020–2049) under the RCP4.5 scenario, as well as to reduce uncertainty using ensemble methods.

The results of the model comparison revealed that the MRI-CGCM3, MPI-ESM-LR, BNU-ESM, ACCESS1-0, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, and MPI-ESM-MR models performed better in simulations. As expected, the models with the lowest errors received the highest weights, indicating that they were the most reliable for simulating precipitation, maximum temperature, and minimum temperature in the past period. These models can thus be considered the most suitable for future predictions, with the least uncertainty in temperature and precipitation simulations.

An examination of statistical coefficients from different ensemble methods showed that the Modified Ensemble Projection (MEP) method provided the best estimation, with a coefficient of determination (R^2) of 0.95 and an efficiency coefficient (ME) of 0.92, compared to baseline data from the Kermanshah synoptic station. Consequently, this method was identified as the optimal ensemble approach for AOGCM models.

*.Corresponding author : Dr. Golale Ghaffari

E-mail address: g.ghaffari@areeo.ac.ir

How to cite this article: Ghaffari, G., & Salajegh, A. (2025). Forecasting Precipitation and Temperature in the Qareh-Sou Watershed: Emphasizing Model Uncertainties. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), pp1-21. <https://doi.org/10.22067/geoeoh.2024.86195.1450>



Extended Abstract

Introduction

Climate change, driven by global warming, poses an existential threat to both natural and human systems, necessitating accurate and reliable projections of future climate variations. While extensive research has examined the impacts of climate change on various subsystems and proposed adaptation and mitigation strategies, many studies have overlooked the inherent uncertainties in climate modeling. Limiting analyses to selected scenarios from Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCMs) and neglecting uncertainty analysis reduces the credibility and certainty of the final results. Indeed, uncertainties arising from structural and parametric diversity in models, downscaling processes, and impact assessment models require rigorous investigation and quantification.

A comprehensive assessment of climate change impacts requires the identification and analysis of three primary categories of uncertainty:

1. Uncertainties associated with the structure and parameters of AOGCMs;
2. Uncertainties arising from statistical and dynamical downscaling methods at regional scales; and
3. Parametric and structural uncertainties in impact assessment models.

AOGCMs, due to their diversity in structure and parameters, produce varying outputs for climatic variables, representing a significant source of uncertainty in climate projections. Incorporating uncertainties into climate change impact assessments leads to various plausible future scenarios that can inform decision-making and adaptation planning. Given computational and data limitations, a comprehensive examination of all uncertainty sources in every study is infeasible. However, studies have shown that certain uncertainties, such as those related to downscaling methods, significantly impact the final results and must be considered in assessing climate change impacts on river flows. Employing multi-model ensemble approaches and ensemble prediction methods to quantify and reduce uncertainties arising from AOGCMs is an effective strategy adopted in this research.

Material and Method

The Qarasu watershed, located in western Iran within Kermanshah province, served as the focal point of this study. Observational data spanning 1976–2005 were obtained from the Kermanshah synoptic station, courtesy of the Iran Meteorological Organization. Complementing this, downscaled data from 21 Global Circulation Models (GCMs) were acquired from the NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP) dataset. This dataset encompassed both the historical (1976–2005) and future (2020–2049) periods under the Representative Concentration Pathway 4.5 (RCP4.5) scenario, selected for its intermediate climate change trajectory.

Following meticulous data validation and preprocessing, the uncertainty inherent in the GCMs was rigorously assessed. To evaluate GCM performance, the coefficient of determination (R^2) and Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) were computed, facilitating a comparative analysis between simulated temperature and precipitation under RCP4.5 and observed values from the Kermanshah synoptic station.

To address and mitigate uncertainties in climate projections, this research employed a suite of ensemble methods, including ensemble prediction (EP), multi-model ensembles (MEP), and weighted multi-model ensembles (MEPWi), rather than relying solely on individual model outputs. The fundamental premise underpinning these methods is that models demonstrating superior skill in replicating historical climate patterns are anticipated to maintain their relative accuracy in future projections, thereby identifying them as optimal candidates. Consequently, the

weight assigned to each model within the ensemble is directly proportional to its historical performance. Finally, the accuracy of the model simulations relative to observational data was evaluated using R^2 and NSE.

Results and Discussion

The findings indicated that MRI-CGCM3, MPI-ESM-LR, BNU-ESM, ACCESS1-0, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, and MPI-ESM-MR exhibited robust performance in simulating monthly precipitation patterns. Concurrently, ACCESS1-0, CNRM-CM5, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, and BNU-ESM demonstrated heightened accuracy in replicating temperature regimes. Notably, MRI-CGCM3, MPI-ESM-MR, and MIROC-ESM-CHEM were assigned the highest weights and exhibited the lowest uncertainty in their simulations of monthly precipitation, maximum temperature, and minimum temperature, signifying their superior fidelity and minimal deviation.

Analysis of statistical metrics from the ensemble methods revealed that the multi-model ensemble prediction (MEP) approach, characterized by an R^2 of 0.95 and NSE of 0.92, provided the most congruent estimates compared to baseline data from the Kermanshah synoptic station. Consequently, the MEP method was adjudicated as the optimal ensemble prediction paradigm for GCMs in this study.

Scrutiny of mean monthly and annual fluctuations under the MEP framework projected that:

- Monthly and annual precipitation are anticipated to change by 1.9% and 22.7%, respectively, in the future period.
- Mean monthly and annual temperature increments are projected to be 1.89°C and 1.88°C, respectively.

Conclusions

This study examined and compared various climate modeling methodologies to mitigate uncertainty in climate projections. Our findings reveal that no single climate model accurately predicts all climatic parameters within a given region. Optimal projections for temperature and precipitation necessitate the utilization of multiple models, underscoring the importance of multi-model ensemble techniques. We evaluated three ensemble methods: Model Ensemble with Weighting (MEPWi), Model Ensemble Projection (MEP), and Ensemble Prediction (EP).

The results indicated that projected values from these methods were relatively consistent, with minimal discernible differences. However, the MEP method yielded the most precise estimates for temperature and precipitation, establishing it as the superior technique for reducing uncertainty in climate projections. This research emphasizes that leveraging diverse climate models significantly enhances projection accuracy and reduces uncertainties. Relying solely on a single GCM is insufficient for formulating robust strategies to mitigate climate change impacts. Our results align with prior research demonstrating the efficacy of multi-model ensembles in improving predictive accuracy.

In summary, this study demonstrates that applying climate model ensemble techniques, particularly the MEP method, substantially improves the reliability of climate projections. This enhanced precision is crucial for enabling policymakers and planners to make informed decisions aimed at mitigating climate change impacts. Future studies could explore the performance of these ensemble methods under different climate scenarios and in other regions.



پیش‌نمایی بارش و دمای حوزه آبخیز قره‌سو با تأکید بر عدم قطعیت مدل‌های گردش

عمومی

گل‌اله غفاری^{۱*}، علی سلاجقه^۲

^۱ استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان

کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

^۲ استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله	از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت در مباحث تغییر اقلیم به‌کارگیری مدل‌های مختلف گردش عمومی است که خروجی‌های متفاوتی را برای متغیرهای اقلیمی تولید می‌کند. در کل استفاده از چندین مدل گردش عمومی و یا روش‌های اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP) برای تأکید بر عدم قطعیت در پیش‌نمایی اقلیم، به‌علت تفاوت‌های ساختاری در مدل‌های جهانی اقلیم و همچنین عدم اطمینان در تغییرات شرایط اولیه مدل‌ها یکی از راهکارهای کاهش عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی است. برای این منظور داده‌های ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه در بازه زمانی ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵ از سازمان هواشناسی و داده‌های ریزگردانی شده حاصل از ۲۱ مدل گردش عمومی از سایت NASA (NEX-GDDP) برای دوره گذشته (۱۹۷۶-۲۰۰۵) و آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) تحت سناریو RCP4.5 دریافت و پس از اطمینان از صحت داده‌ها و پیش‌پردازش‌های لازم، عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی بررسی و جهت کاهش عدم قطعیت آن‌ها از روش‌های مختلف اجرای ترکیبی استفاده شد. نتایج مقایسه مدل‌ها نشان داد که مدل‌های MRI-CGCM3، MPI-ESM-LR، BNU-ESM، ACCESS1-0، MIROC-ESM و MPI-ESM-MR از عملکرد مناسب‌تری در شبیه‌سازی دما و بارش برخوردار بوده‌اند. همچنین چنانچه انتظار می‌رفت بیشترین وزن به مدل‌هایی که کمترین خطا را داشته‌اند تعلق گرفته است، به‌گونه‌ای که این مدل‌ها بیشترین وزن را در مدل‌سازی بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل دوره گذشته داشته‌اند و می‌توانند به‌عنوان مناسب‌ترین مدل‌های پیش‌نمایی در آینده
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۳/۳۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۱۸	
کلمات کلیدی:	
مجموعه‌های مدل‌های اقلیمی کمی‌سازی	
عدم قطعیت سناریوی RCP4.5	
عدم قطعیت	
ریزمقیاس‌سازی	
مجموعه‌های چندمدلی (MMES)	
کارایی نش-ساتکلیف (NSE)	

معرفی شوند که دارای کمترین عدم قطعیت در شبیه‌سازی دما و بارش می‌باشند. بررسی نتایج ضرایب آماری روش‌های مختلف اجرای ترکیبی نشان داد که روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) با ضریب تعیین (R^2) ۰/۹۵ و ضریب کارایی (ME) ۰/۹۲ تخمین بهتری را در مقایسه با داده‌های دوره پایه در ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه ارائه داده است و در نهایت این روش به‌عنوان بهترین روش اجرای ترکیبی مدل‌های گردش عمومی در نظر گرفته شد.

مقدمه

با توجه به اینکه گرمایش زمین عامل تهدید کننده‌ای برای زندگی بشر در کره زمین است، پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در آینده امری ضروری به حساب می‌آید. اگرچه تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر سامانه‌های مختلف انجام پذیرفته و رویکردهای مختلف و نحوه کاهش خسارت مورد بررسی قرار گرفته، ولی در بعضی از این تحقیقات عدم قطعیت‌های موجود نادیده گرفته شده و در بررسی‌ها به تحلیل حساسیت و یا آسیب‌پذیری سامانه‌ها نسبت به یک یا چند سناریو از مدل‌های ^۱ AOGCM بسنده شده است. این در حالی است که نادیده گرفتن عدم قطعیت‌ها در مراحل مختلف ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم از طریق به کارگیری مدل‌های مختلف گردش عمومی، باعث می‌شود تا از میزان قطعیت خروجی نهایی سامانه کاسته شود زیرا همواره ممکن است در شبیه‌سازی‌ها همه عوامل رخ دادن یک متغیر در مدل وارد نشود، بنابراین تحلیل با خطا یا عدم قطعیت همراه است. شناخت مقدار خطا و یا عدم قطعیت هر مدل، در قضاوت و اطمینان به نتایج ضروری است (Wilby, Tomlinson & Dawson, 2003).

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم شامل شناسایی سه جنبه کلیدی از عدم قطعیت است: نخست، عدم قطعیت در زمینه مدل‌های گردش کلی. دوم: عدم قطعیت در اقلیم‌شناسی در مقیاس منطقه‌ای شامل عدم قطعیت در روش‌های ریز گردانی نمایی آماری یا دینامیکی و سوم، عدم قطعیت‌های پارامتری و ساختاری در مدل‌های مختلفی که برای ارزیابی اثرات استفاده می‌شود (Effron & Tibshirani, 1993). همان‌گونه که ذکر گردید از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت در مباحث تغییر اقلیم به کارگیری مدل‌های مختلف گردش کلی است که خروجی‌های متفاوتی را برای متغیرهای اقلیمی تولید می‌کند (Lane, Kirshen & Vogel, 1999; Mitchell, 2003; Wilby & Harris, 2006).

با منظور نمودن عدم قطعیت‌ها، نتایج دامن‌های از حالات محتمل آینده را در بر می‌گیرد. این حالات محتمل گاهی بسیار متفاوت هستند. لذا لازم است در تصمیم‌گیری‌ها و اتخاذ تدابیر آمادگی با شرایط تغییر یافته آینده در نظر گرفته شوند (Pinto et al., 2023). به دلیل محدودیت‌ها از جمله محدودیت دسترسی به داده‌ها و هزینه‌های محاسباتی مدل‌ها، کارشناس و ... در نظر گرفتن همه عدم قطعیت‌ها در همه مطالعات ممکن نیست. نتایج مطالعاتی که عدم قطعیت‌ها را در ارزیابی آثار تغییر اقلیم بررسی کرده‌اند، نشان داده است

1 Atmosphere-Ocean General Circulation Model

که تعدادی از عدم قطعیت‌ها مانند عدم قطعیت روش‌های ریزگردانی یا پارامترهای مدل را می‌توان نادیده گرفت، اما بعضی از عدم قطعیت‌ها اثر مهمی بر نتایج دارند و لازم است که در ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه مورد توجه قرار گیرند.

در کل استفاده از چندین مدل گردش عمومی و یا روش‌های اجرای ترکیبی مدل‌ها^۱ (EP) برای تأکید بر عدم قطعیت در پیش‌نمایی آب و هوا، به‌علت تفاوت‌های ساختاری در مدل‌های جهانی آب و هوا و همچنین عدم اطمینان در تغییرات شرایط اولیه مدل‌ها یکی از راهکارهای کاهش عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی می‌باشد که در این تحقیق مدنظر قرار گرفته است (Semenov & Stratonovitch, 2010).

پینتو و همکاران (Pinto et al., 2023) در مطالعه‌ای با کمک روش‌های ترکیبی مدل‌های گردش عمومی در آنگولا نشان دادند که آنگولا با افزایش دما و تغییرات در الگوهای بارندگی به‌دلیل تغییرات آب و هوایی روبرو است. همراه با پیش‌بینی‌هایی که نشان دهنده شب‌های گرم‌تر، روزهای گرم‌تر و رویدادهای بارش سنگین‌تر در آینده است. گائو و همکاران (Gao, Sokolov & Schlosser, 2023) در مطالعه‌ای در چین با استفاده از روش اجرای ترکیبی مدل‌های گردش عمومی اقدام به پیش‌بینی تغییرات اقلیمی نمودند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که استفاده از روش‌های اجرای ترکیبی در مقایسه با اجرای مدل‌ها به‌صورت انفرادی نتایج دقیق‌تری را برای پیش‌بینی‌ها ارائه می‌کند. سرکوئرا و تورگو (Cerqueira & Torgo, 2023) در مطالعه‌ای از مجموعه‌ای از مدل‌های اقلیمی برای پیش‌بینی دما و بارش استفاده نمودند. این مطالعه شامل ۳۵۶۸ سری داده و ۳۰ مدل اقلیمی بود. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که در آینده با افزایش دما مواجه شده و استفاده از مدل‌های مختلف می‌تواند دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهد.

در مطالعه چن و همکاران (Chen et al., 2023) رویکرد ترکیبی مدل‌ها با استفاده از روش وزن‌دهی REA برای ارزیابی تأثیرات تغییرات اقلیمی آینده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج پژوهش یاد شده نشان داد مجموعه‌ای از چندین مدل با بهره‌گیری از قوت‌ها و کاهش ضعف‌های هر شبیه‌ساز آب و هوا، قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌ها را افزایش می‌دهد. نتایج نشان داد روش میانگین‌گیری چند مدل پیشنهادی در کاهش خطای میانگین مربعات (RMSE) به ترتیب ۵ و ۵۴ درصد در شرایط بارندگی مرطوب و خشک از روش‌های موجود بهتر عمل کرد.

ژو و همکاران (Xu et al., 2019) اقدام به بررسی عدم قطعیت ۱۸ مدل گردش عمومی و سناریوهای انتشار در پیش‌بینی بارش‌های حداکثر در کشور چین نمودند و بدین‌منظور از روش‌های اجرای ترکیبی جهت کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها استفاده نمودند. تحقیقات آنها نشان داد که عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی بسیار بزرگ‌تر از سناریوهای انتشار می‌باشد و در دوره ۲۰۲۰-۲۱۰۰ بارش‌ها دارای شدت بیش‌تر و مدت کمتر خواهند شد که این امر در RCP8.5 بسیار شدیدتر خواهد بود. در مطالعه‌ای دیگر چیلکوتی و همکاران (Chilkoti, Bolisetti & Balachandar, 2017) از روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها^۲ (MEP)

1 Ensemble Performance

2 Multi Ensemble Performance

برای کاهش عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که روش اجرای ترکیبی در مطالعات تغییر اقلیم باعث کاهش عدم قطعیت و افزایش دقت پیش‌بینی‌ها می‌شود. همچنین در تحقیقات فو و همکاران (Fu et al., 2005) کاهش معنی‌دار خطای اریبی در شبیه‌سازی بارش و دما توسط اجرای ترکیبی ۸ مدل RCM به‌روش وزنی در مقایسه با اجرای منفرد هر مدل مشاهده شد.

سمنوف و استراتونویچ (Semenov & Stratonovitch, 2010) با اجرای ترکیبی ۱۵ مدل گردش عمومی به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در انگلستان پرداخته و بر کاهش معنی‌دار عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها در مقایسه با استفاده از یک مدل منفرد تأکید نمودند. فولر و اکستروم (Fowler & Ekström, 2009) نیز توسط اجرای ترکیبی ۱۳ مدل RCM بر اساس روش وزنی به مطالعه اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی انگلستان در دوره ۲۰۷۰-۲۱۰۰ پرداخته و به کاهش قابل توجه خطای مدل‌ها و در نتیجه کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی بارش اشاره نمودند. اشرف و همکاران (Ashraf, Alizadeh, Mousavi Baygi & Bannayan Awal, 2014) در تحقیقی اقدام به صحت‌سنجی داده‌های دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط اجرای منفرد و گروهی پنج مدل گردش عمومی برای منطقه شمال شرق ایران نمودند و برای این منظور از ۵ مدل BCM2، CGCM3، CNRMCM3، MIROC3.2 و MRICGCM2.3 و اجرای ترکیبی آن‌ها (EP) استفاده نمودند. نتایج نشان داد که بر اساس اجرای منفرد مدل‌ها، مدل‌های MIROC3.2، MRICGCM2.3 و CNRMCM3 به‌ترتیب در تربت حیدریه، سبزوار و مشهد دقیق‌ترین پیش‌بینی را برای بارش ارائه کردند. به‌طور کلی بررسی آماره‌های محاسبه شده توسط اجرای گروهی ۵ مدل منتخب نشان از کاهش چشم‌گیر خطای شبیه‌سازی و در نتیجه افزایش دقت پیش‌بینی‌های صورت گرفته داشته است.

بررسی‌ها نشان داد که عدم قطعیت در مدل‌های گردش عمومی اثیر زیادی بر پیش‌بینی‌های اقلیمی دارد، زیرا این مدل‌ها خروجی‌های گوناگونی را تولید می‌کنند. اگر چه تحقیقات قبلی در این زمینه انجام شده است، اما تحقیقات در مورد عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی و روش‌های کاهش آنها به میزان کافی انجام نشده است. بنابراین، این تحقیق می‌تواند به ما در درک بهتر از تغییرات اقلیمی و مدیریت منابع آب کمک کند (Khazaei & Khazaei, 2018; Mitchell, 2003; Wilby & Harris, 2006). در این مقاله، تلاش شده است تا اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش بررسی شود و علاوه بر آن، عدم قطعیت در مدل‌های گردش عمومی و روش‌های کاهش آنها مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه داده‌های ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه در بازه زمانی ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵ از سازمان هواشناسی و داده‌های ریز گردانی شده حاصل از ۲۱ مدل گردش عمومی از سایت NASA^۱ (NEX-GDDP) برای دوره

1 NASA Earth Exchange (NEX) Global Daily Downscaled Projections (GDDP)

گذشته (۱۹۷۶-۲۰۰۵) و دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) تحت سناریو RCP4.5 (به دلیل در نظر گرفتن شرایط اقلیمی متوسط) دریافت و پس از اطمینان از صحت داده‌ها و پیش پردازش‌های لازم، عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی بررسی شد. با توجه به اهمیت مدل‌های اقلیمی به عنوان ابزار اصلی در تحقیقات تغییر اقلیم و نیز تعدد این مدل‌ها، انتخاب بهترین و مناسب‌ترین مدل از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. لذا لازم است تحقیقاتی در خصوص صحت‌سنجی این مدل‌ها انجام شده و مدل بهینه هر منطقه در جهت به حداقل رساندن عدم قطعیت‌های موجود در پیش‌بینی‌های اقلیمی انتخاب گردد (Andarzian et al., 2011). جهت صحت‌سنجی مدل‌های گردش عمومی ابتدا مقدار ضریب تعیین (R^2) و میزان ضریب کارایی (ME) برای مقایسه دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل‌ها بر اساس سناریوی انتشار RCP4.5 و مقادیر واقعی ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه محاسبه شد. در جدول ۱ مدل‌های گردش عمومی استفاده شده در این تحقیق ارائه شده است.

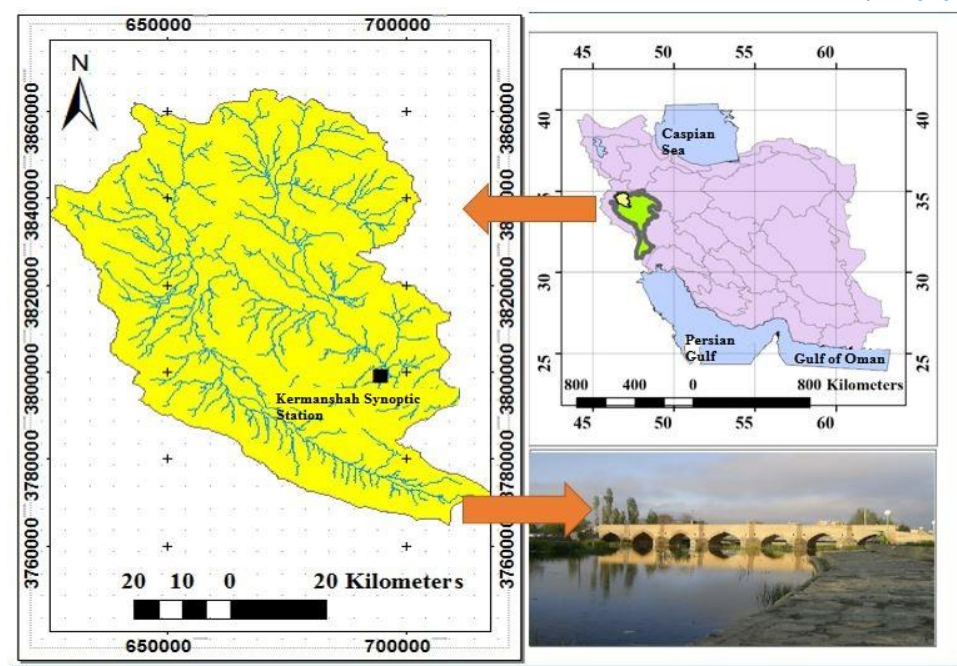
جدول ۱- مدل‌های گردش عمومی استفاده شده

Table-1 The general circulation models used

نام مدل Model	کشور Country
ACCESS1-0	CSIRO-BOM (Australia)
BCC-CSM1.1	BCC (China)
BNU-ESM	BNU (China)
CanESM2	CCCMA (Canada)
CCSM4	NCAR (USA)
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS (France)
CESM1-BGC	NCAR (USA)
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE (Australia)
GFDL-CM3	GFDL (USA)
GFDL-ESM2G	GFDL (USA)
GFDL-ESM2M	GFDL (USA)
INM-CM4	INM (Russia)
IPSL-CM5-LR	IPSL (France)
IPSL-CM5-MR	IPSL (France)
MIROC5	AORI-NIES (Japan)
MIROC-ESM	AORI-NIES (Japan)
MIROC-ESM-CHEM	AORI-NIES (Japan)
MPI-ESM-LR	MPI-M (Germany)
MPI-ESM-MR	MPI-M (Germany)
MRI-CGCM3	MRI (Japan)
NorESM1-M	NCC (Norway)

حوزه آبخیز قره‌سو در نیمه غربی کشور و در استان کرمانشاه، در ارتفاعات زاگرس و در حد فاصل عرض‌های جغرافیایی ۳۴° ۰۰ و ۳۴° ۴۵ و طول‌های جغرافیایی ۴۶° ۲۲ و ۴۷° ۲۲ واقع شده و بیشینه ارتفاع آن ۳۳۵۶ متر و کمینه ارتفاع ۱۲۷۵ متر از سطح دریاست. مساحت حوزه ۵۳۰۱ کیلومتر مربع و شیب متوسط

حوضه حدود ۱۶ درصد می‌باشد. متوسط بارش سالیانه در کل حوزه بین ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر متغیر می‌باشد که ماه‌های دی و بهمن از بیشترین و ماه‌های خرداد، تیر و مرداد از کمترین بارش برخوردار هستند. با توجه به دوره پایه مدل‌های اقلیمی (۱۹۷۶-۲۰۰۵)، ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه در این حوزه به‌علت دارا بودن بازه زمانی بلند مدت داده‌های هواشناسی، از حوضه‌های بسیار مناسب برای انجام مطالعات تغییر اقلیم می‌باشد. شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی داخل و خارج حوزه را نشان می‌دهد (Heidari & Khazaei, 2018).



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و هیدرومتری حوزه آبخیز قره‌سو

Fig.1. The location of synoptic and hydrometric stations in the Qarasu watershed of Iran

کاهش عدم قطعیت مدل‌ها با روش‌های مختلف اجرای ترکیبی

چشم‌پوشی از عدم قطعیت‌های مرتبط با تغییر اقلیم در تحقیقات، از اعتبار نتایج کاسته و منجر به اعمال نتایج غیر واقعی و غیر کاربردی به کاربران خواهد شد. اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP)، اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) و اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها با روش وزن‌دهی^۱ (MEPWi) یا به عبارت دیگر استفاده از چندین مدل به جای اجرای منفرد مدل‌ها، جهت کاهش عدم قطعیت‌های پیش‌بینی‌های اقلیمی توصیه شده است (Whetton, Hennessy, Bates & Kent, 2010). اجرای ترکیبی چندین مدل از جمله روش‌های کاهش عدم قطعیت‌های پیش‌بینی است که به روش‌های مختلف از جمله روش وزنی قابل محاسبه است (Fu et al.,

1 Multi Ensemble Performance Wi

2005Fowler & Ekström, 2009): بر طبق این روش مدل‌های منتخب بر اساس میزان انحراف پارامتر هواشناسی شبیه‌سازی شده در دوره پایه از میانگین داده‌های مشاهداتی این دوره، طبق رابطه (۱) وزن‌دهی می‌شوند (Fu et al., 2006Wilby & Harris, 2006). در حقیقت بر اساس این روش، هر مدل که وزن بیشتری در مدل‌سازی گذشته منطقه داشته باشد، طبیعتاً انتظار می‌رود در مدل‌سازی آینده هم کم و بیش همان وزن را داشته باشد و بنابراین به‌عنوان مدل بهینه انتخاب خواهد شد (Fowler & Ekström, 2009; Wilby & Harris, 2006).

$$W_i = \frac{\left(\frac{1}{\Delta F_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\Delta F_i}\right)^2} \quad (1)$$

در این رابطه W_i وزن هر مدل در ماه مورد نظر، ΔF_i انحراف میانگین بلند مدت متغیر شبیه‌سازی شده توسط هر یک از مدل‌ها در دوره پایه (دما و بارش) از میانگین داده‌های واقعی یا مشاهده شده و n تعداد مدل‌ها می‌باشد. سپس وزن محاسبه شده مدل‌ها (W_i) در مقادیر میانگین آن‌ها در ماه مورد نظر (M_i) ضرب شده و سپس مقادیر حاصل، مطابق رابطه (۲) با هم جمع می‌شوند (Fu et al., 2005).

$$E = \sum_{i=1}^n W_i M_i \quad (2)$$

در نهایت جهت ارزیابی میزان دقت مدل در شبیه‌سازی در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای از روش‌های ضریب تعیین (R^2) و ضریب کارایی (ME) استفاده به عمل آمد.

نتایج و بحث

جهت بررسی میزان دقت و صحت‌سنجی مدل‌های گردش عمومی ابتدا مقدار ضریب تعیین (R^2) و میزان ضریب کارایی (ME) جهت مقایسه دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های گردش عمومی و مقادیر واقعی ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه در طول دوره پایه (۱۹۷۶-۲۰۰۵) محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- نتایج صحت‌سنجی مدل‌های گردش عمومی و مقدار ضریب تعیین (R^2) و میزان ضریب کارایی (ME)

Table-2 Validation results of General Circulation Models and the coefficient of determination (R^2) and model efficiency (ME)

دمای حداقل		دمای حداکثر		بارش		مدل‌های گردش
MINIMUM TEMPERATURE		MAXIMUM TEMPERATURE		PRECIPITATION		عمومی
ضریب	ضریب تعیین	ضریب	ضریب تعیین	ضریب	ضریب تعیین	General Circulation Models (GCMs)

کارایی (ME)	(R ²)	کارایی (ME)	(R ²)	کارایی (ME)	(R ²)	
Model Efficiency	Coefficient of Determination	Model Efficiency	Coefficient of Determination	Model Efficiency	Coefficient of Determination	
1	0.94	1	0.94	0.88	0.93	ACCESS1-0
0.61	0.54	0.67	0.54	0.72	0.75	BCC-CSM-1-1
0.94	0.69	0.96	0.69	0.90	0.83	BNU-ESM
0.61	0.89	0.67	0.89	0.77	0.91	CanESM2
0.61	0.94	0.67	0.94	0.73	0.71	CCSM4
0.60	0.60	0.67	0.60	0.61	0.65	CESM1-BGC
1	0.65	1	0.65	0.64	0.68	CNRM-CM5
0.60	0.68	0.67	0.68	0.63	0.61	CSIRO-Mk3-6-0
0.63	0.67	0.69	0.67	0.70	0.72	GFDL-CM3
0.64	0.59	0.71	0.59	0.73	0.73	GFDL-ESM2G
0.64	0.60	0.71	0.60	0.60	0.61	GFDL-ESM2M
0.60	0.60	0.66	0.60	0.71	0.71	INM-CM4
0.61	0.60	0.67	0.60	0.68	0.65	IPSL-CM5A-LR
0.61	0.95	0.67	0.95	0.72	0.70	IPSL-CM5A-MR
0.60	0.95	0.67	0.95	0.77	0.76	MIROC5
1	0.95	1	0.95	0.84	0.91	MIROC-ESM
1	0.95	1	0.95	0.84	0.84	MIROC-ESM-CHEM
1	0.94	1	0.94	0.91	0.87	MPI-ESM-LR
1	0.94	1	0.94	0.82	0.82	MPI-ESM-MR
1	0.58	1	0.58	0.93	0.73	MRI-CGCM3
0.61	0.60	0.66	0.60	0.71	0.71	NorESM1-M

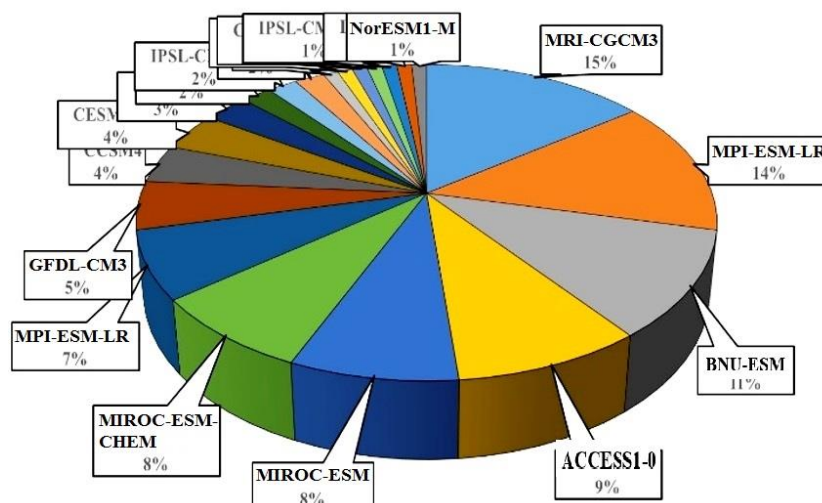
جدول ۲ عملکرد مدل‌های گردش عمومی را در شبیه‌سازی مقادیر دما و بارش ماهانه برای منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در خصوص بارش مدل‌های BNU-ESM، MPI-ESM-LR، MRI-CGCM3، ACCESS1-0، MIROC-ESM، MIROC-ESM-CHEM و MPI-ESM-MR از عملکرد مناسب‌تری در شبیه‌سازی بارش ماهانه برخوردار بوده‌اند و مدل‌های IPSL-CM5A-LR، CNRM-CM5، GFDL-ESM2M، CESM1-BGC، Mk3-6-0 از کم‌ترین میزان همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده میانگین بارش ماهانه برخوردار می‌باشند. در خصوص دما نیز مدل‌های ACCESS1-0، CNRM-CM5، MIROC-ESM، MIROC-ESM-CHEM، MPI-ESM-LR، MPI-ESM-MR، MRI-CGCM3 و BNU-ESM از عملکرد مناسب‌تری در شبیه‌سازی برخوردار بوده‌اند و مدل‌های IPSL-CM5A-LR، IPSL-CM5A-MR، MIROC5، INM-CM4 و CSIRO-Mk3-6-0

NorESM1-M دارای کمترین همبستگی با داده‌های مشاهداتی هستند. مدل‌های پیش‌بینی دما و بارش معمولاً پیچیده هستند و از ترکیب عوامل مختلفی مانند فیزیک جو، اقلیم، اقیانوس‌ها، و تراز توزیع بارش استفاده می‌کنند. ممکن است مدل‌هایی که بیشترین پیچیدگی را دارند، عملکرد بهتری داشته باشند.

بررسی عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی

نتایج وزن‌دهی هر مدل در مدل‌سازی بارش و دما در دوره پایه (۱۹۷۶-۲۰۰۵) در شکل ۲ ارائه شده است. این نمودار به وضوح نشان می‌دهد که در مدل‌سازی بارش و دما در دوره پایه (۱۹۷۶-۲۰۰۵)، بیشترین وزن به مدل‌هایی که کمترین خطا را داشته‌اند تعلق گرفته است. به عبارت دیگر، مدل‌هایی که نتایج دقیق‌تری در شبیه‌سازی بارش و دما ارائه داده‌اند، وزن بیشتری در تحلیل‌ها و پیش‌بینی‌ها دارند. این انتخاب بر اساس انتظار است که مدل‌های با عملکرد بهتر و دقیق‌تر در شبیه‌سازی مقادیر بارش و دما در دوره گذشته، در پیش‌بینی‌های آینده نیز دقیق‌تر باشند و کمترین عدم قطعیت را داشته باشند.

مدل‌های MRI-CGCM3، MPI-ESM-LR، BNU-ESM، ACCESS1-0، MIROC-ESM، و MIROC-ESM-CHEM بیشترین وزن را در مدل‌سازی بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل دوره گذشته داشته‌اند. این مدل‌ها به عنوان مدل‌های پیش‌بینی در آینده معرفی می‌شوند که دارای کمترین عدم قطعیت در شبیه‌سازی دما و بارش هستند. همچنین، مدل MRI-CGCM3 در شبیه‌سازی بارش، مدل MPI-ESM-MR در شبیه‌سازی دمای حداکثر و مدل MIROC-ESM-CHEM در شبیه‌سازی دمای حداقل، بیشترین وزن و کمترین میزان عدم قطعیت را دارند، که نشان از دقت بالا و کمترین میزان خطا در شبیه‌سازی این متغیرها توسط این مدل‌ها دارد. این نتایج می‌توانند به اطمینان در استفاده از این مدل‌ها در پیش‌بینی‌های آینده اقلیمی منجر شوند.

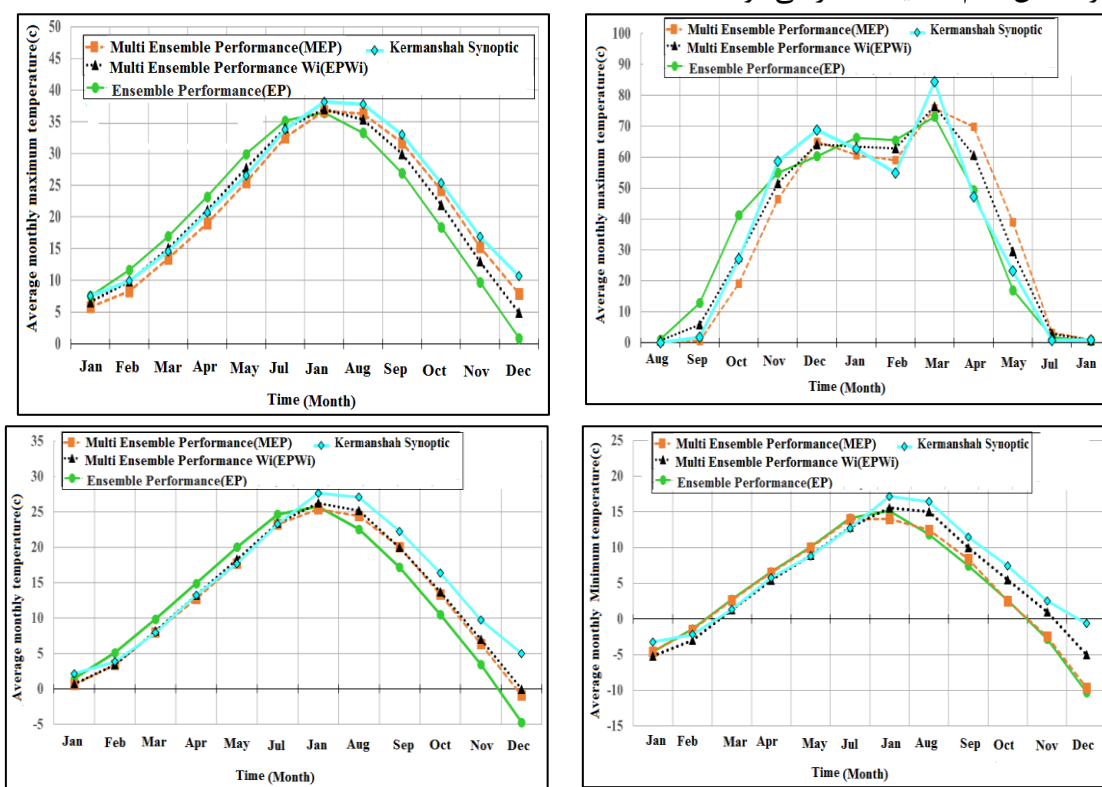


شکل ۲- نتایج وزن‌دهی هر مدل در مدل‌سازی بارش و دما در دوره پایه ۱۹۷۶-۲۰۰۵

Fig.2. Results of weighting each model in modeling precipitation and temperature in the baseline period (1976-2005)

کاهش عدم قطعیت مدل‌ها با روش‌های اجرای ترکیبی

در این مطالعه، برای کاهش عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی از سه روش اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP)، اجرای ترکیبی با وزن‌دهی (MEPWi) و اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) استفاده شده است. نتایج این روش‌ها در دوره پایه (۱۹۷۶-۲۰۰۵) در شکل ۳ ارائه شده است و مقادیر ضریب تعیین (R^2) و ضریب کارایی (ME) آنها در جدول ۳ قابل مشاهده است. بررسی نمودارهای این روش‌ها در دوره پایه نشان داد که روش ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) نسبت به داده‌های ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه، نزدیک‌ترین شبیه‌سازی را ارائه داده است. به همین دلیل، این روش به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای کاهش عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی انتخاب شده است. وجود تنوع در مدل‌های مختلف که در روش MEP استفاده می‌شوند، می‌تواند بهبود شبیه‌سازی و پیش‌بینی را ایجاد کند. این تنوع می‌تواند شامل استفاده از مدل‌های مختلف با روش‌های مختلف مدل‌سازی یا پارامترهای مختلف مدل‌سازی باشد که در ترکیب با یکدیگر به دقت بالا و کاهش عدم قطعیت منجر می‌شود.



شکل ۳- نتایج روش‌های اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP)، اجرای ترکیبی مدل‌ها با روش وزن‌دهی (MEPWi)، اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) در برآورد بارش، دمای حداکثر، دمای حداقل و دمای متوسط ماهانه در دوره پایه (۱۹۷۶-۲۰۰۵)

Fig.3. Results of different ensemble methods: the Equal-Weight Ensemble (EP), the Weighted Ensemble (MEPWi), and the Partial Model Ensemble (MEP) for estimating

precipitation, maximum temperature, minimum temperature, and average monthly temperature in the baseline period (1976-2005)

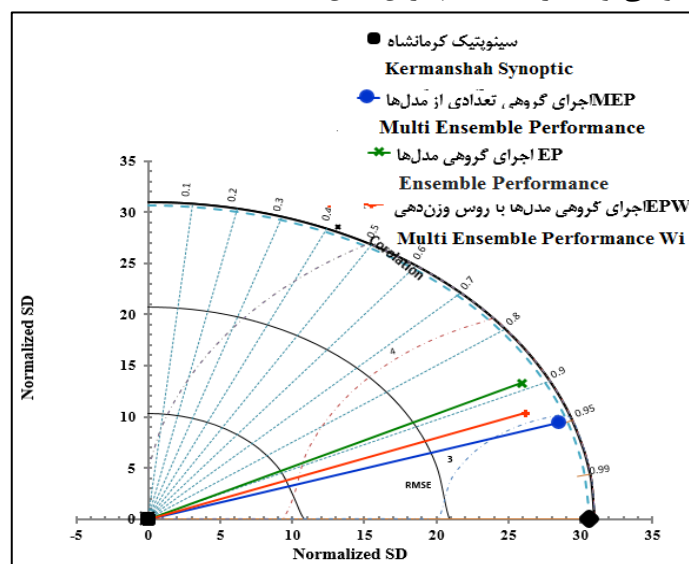
جدول ۳- نتایج ضریب تعیین (R^2) و ضریب کارایی (ME) با روش‌های مختلف اجرای ترکیبی مدل‌ها

Table-3 Results for the coefficient of determination (R^2) and model efficiency (ME) using various ensemble methods

ضریب کارایی (ME) MODEL EFFICIENCY			ضریب تعیین (R^2) COEFFICIENT OF DETERMINATION			روش‌های اجرای ترکیبی مدل‌ها ENSEMBLE METHOD OF MODELS
دمای حداقل Min. Temp.	دمای حداکثر Max. Temp.	بارش precipitation	دمای حداقل Min. Temp.	دمای حداکثر Max. Temp.	بارش precipitation	
0.84	0.84	0.88	0.84	0.84	0.89	اجرای ترکیبی مدل‌ها EP ENSEMBLE PERFORMANCE
0.94	0.94	0.90	0.96	0.96	0.93	وزندهی EPWi MULTI ENSEMBLE PERFORMANCE WI
0.98	0.98	0.92	0.99	0.99	0.95	اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها MEP MULTI ENSEMBLE PERFORMANCE

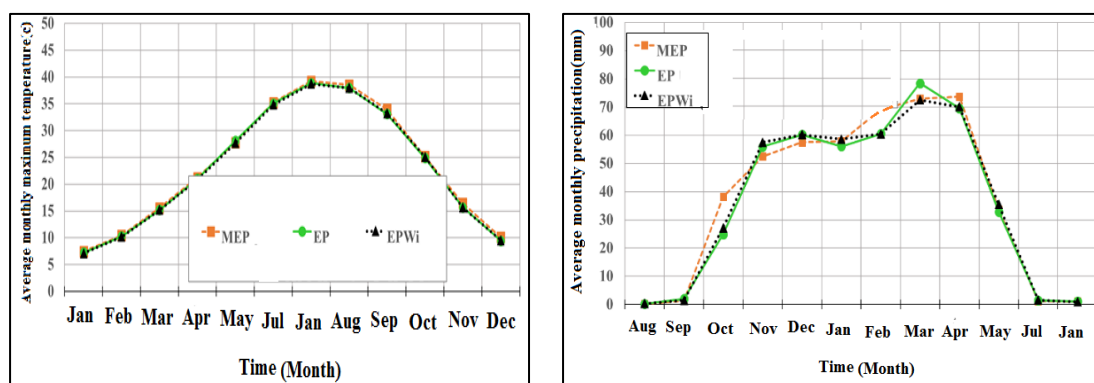
بررسی نتایج ضرایب آماری روش‌های مختلف اجرای ترکیبی نشان داد که روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) با ضریب تعیین (R^2) ۰/۹۵ و ضریب کارایی (ME) ۰/۹۲ تخمین بهتری را در مقایسه با داده‌های دوره پایه در ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه ارائه داده است و در نهایت این روش به‌عنوان بهترین روش اجرای ترکیبی مدل‌های گردش عمومی در نظر گرفته شد. در روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) از چندین مدل گردش عمومی مختلف استفاده می‌شود که این تنوع می‌تواند منجر به بهبود شبیه‌سازی و پیش‌بینی‌های دقیق‌تر در مقایسه با تک‌مدل‌ها شود. مدل‌های مختلف می‌توانند نقاط قوت و ضعف متفاوتی داشته باشند که با ترکیب آن‌ها، عملکرد بهتری به‌دست می‌آید. همچنین در شکل ۴ نمودار تیلور جهت انتخاب بهترین روش اجرای ترکیبی ارائه شده است. نمودار تیلور ابزاری مفید برای ارزیابی و مقایسه مدل‌های مختلف است. این نمودار با در نظر گرفتن همبستگی و انحراف معیار، اقدام به رتبه‌بندی مدل‌ها در یک فضای پیوسته آماری می‌کند. در این دیاگرام، محور X بیانگر مقادیر مشاهده شده و محور Y بیانگر مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل است. نقاطی که در نزدیک محور X و Y قرار دارند، نشان دهنده تطابق بالا بین پیش‌بینی و واقعیت است. با افزایش نقاط در نزدیکی خط تطابق (که معمولاً یک خط میانگین

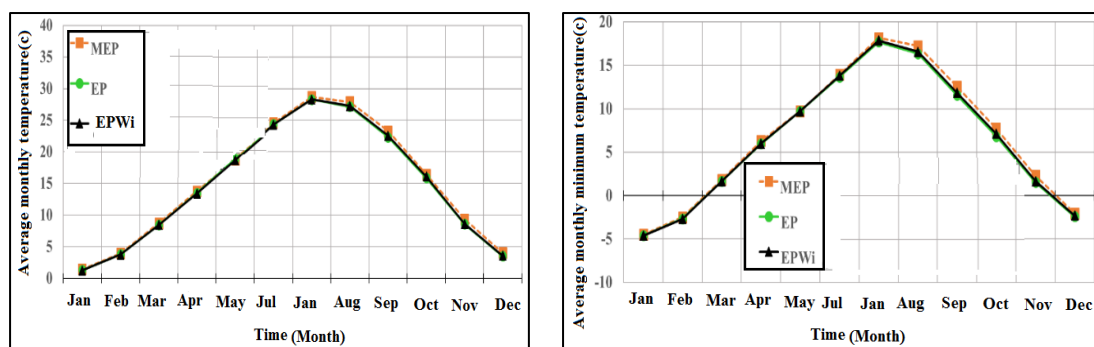
است)، دقت مدل و تطابق آن با داده‌های مشاهده شده افزایش می‌یابد. این نمودار مقایسه دیداری عملکرد مدل‌ها را فراهم می‌کند و می‌تواند در انتخاب بهترین مدل به ما کمک کند (Jahangir & Azimi, 2022).



شکل ۴- نمودار تیلور در روش‌های مختلف اجرای ترکیبی در دوره پایه در مقایسه با ایستگاه سینوپتیک
Fig.4. Taylor diagram comparing different ensemble methods in the baseline period with synoptic station data

در شکل ۵ نمودارهای روش‌های اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP)، اجرای ترکیبی مدل‌ها با روش وزن‌دهی (MEPWi) و اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) ارائه شده است.



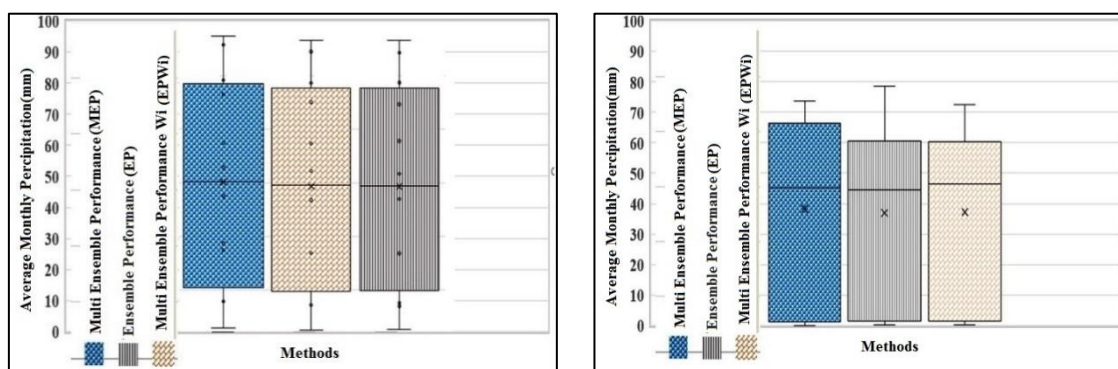


شکل ۵- نتایج روش‌های اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP)، اجرای ترکیبی مدل‌ها با روش وزن‌دهی (MEPWi) و اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) در برآورد بارش، دمای حداکثر، دمای حداقل و دمای متوسط ماهانه در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹)

Fig.5. Results of ensemble methods (EP), weighted ensemble (MEPWi), and partial model ensemble (MEP) for estimating precipitation, maximum temperature, minimum temperature, and average monthly temperature in the future period (2020-2049)

بررسی نمودارهای ترسیم شده روش‌های مختلف اجرای ترکیبی مدل‌ها در برآورد متوسط بارش ماهانه در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) نشان داد که نتایج هر سه روش تقریباً مشابه هم بوده و هر سه روش بارش ماه‌های اردیبهشت تا شهریور را تقریباً یکسان پیش‌بینی نموده‌اند ولی در سایر ماه‌ها دو روش اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP) و اجرای ترکیبی مدل‌ها با روش وزن‌دهی (MEPWi) به همدیگر نزدیک‌تر بوده ولی روش اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP) بارش ماه اسفند را معادل ۷۹ میلی‌متر تخمین زده است که ۶ میلی‌متر بیش‌تر از دو روش دیگر است. روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) میزان بارش را در ماه‌های مهر، بهمن، فروردین بیش‌تر و در ماه‌های آبان، آذر کمتر از دو روش دیگر برآورد نموده است.

بررسی نمودارهای ترسیم شده روش‌های مختلف اجرای ترکیبی مدل‌ها در برآورد پارامترهای دمای ماهانه در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) نیز نشان داد که نتایج هر سه روش مشابه هم بوده اما دو روش اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP) و اجرای ترکیبی مدل‌ها با روش وزن‌دهی (MEPWi) برآوردهای نزدیک به هم انجام داده‌اند ولی روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) میزان دما را در ماه‌های مرداد تا آذر را حدود ۱ درجه بیش‌تر برآورد نموده است. در شکل ۶ نمودار جعبه‌ای دما و بارش برآورد شده توسط هر کدام از روش‌های اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP)، اجرای ترکیبی مدل‌ها با روش وزن‌دهی (MEP) و اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEPWi) در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) ارائه شده است.



شکل ۶- نمودار جعبه‌ای متوسط بارش و دمای متوسط ماهانه در روش‌های مختلف اجرای ترکیبی

Fig.6. Box plot of average monthly precipitation and temperature using different ensemble methods

بررسی نمودار جعبه‌ای فوق نشان داد که روش‌های مختلف اجرای ترکیبی مدل‌ها درباره متغیر دما نتایج مشابهی دارد. البته متغیر دما متغیر پیوسته و منظمی است و پیش‌نمایی آن آسان‌تر است، برخلاف دما نتایج در خصوص بارش کمی متفاوت‌تر است. در رابطه با پارامتر بارش دو روش اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP) و اجرای ترکیبی مدل‌ها با روش وزن‌دهی (MEPWi) تقریباً نتایج یکسانی را ایجاد نموده‌اند به‌گونه‌ای که در هر دو روش میزان متوسط بارش ماهانه ۳۷ میلی‌متر، کمترین میزان بارش صفر، چارک اول بارش ۲ میلی‌متر، چارک سوم ۴۴ و ۴۶ و حداکثر میزان بارش ۷۳ و ۷۹ میلی‌متر در ماه اسفند برآورد شده است. اما در روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) میزان متوسط بارش ماهانه ۳۸ میلی‌متر، کمترین میزان بارش صفر، چارک اول بارش ۱ میلی‌متر، چارک سوم ۴۵ میلی‌متر و حداکثر میزان بارش ۷۴ میلی‌متر در ماه اسفند ماه برآورد شده است. بررسی نمودار جعبه‌ای دمای متوسط ماهانه نیز نشان داد که روش‌های مختلف اجرای ترکیبی مدل‌ها نتایج نزدیکی باهم دارند. به‌گونه‌ای که هر سه روش متوسط دمای ماهانه را ۱۵ درجه سانتی‌گراد و متوسط حداکثر دمای ماهانه را ۲۸ و ۲۹ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهند. در جدول ۴ میزان متوسط تغییرات ماهانه و سالانه پارامترهای دما و بارش در روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) در طی دو دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) و گذشته (۲۰۰۵-۱۹۷۶) ارائه شده است.

جدول ۴- میزان متوسط تغییرات ماهانه و سالانه پارامترهای دما و بارش در روش اجرای ترکیبی تعدادی از

مدل‌ها (MEP)

Table-4 Average monthly and annual changes in temperature and precipitation parameters in the partial model ensemble (MEP)

دماي متوسط Average (c) Temp.	دماي حداقل Min.Temp. (c)	دماي حداکثر Max.Temp. (c)	بارش Precipitation (mm)	زمان Time	دوره Period
13.19	4.91	21.47	36.4	دوره گذشته Past Period	بارش و دمای ماهانه MONTHLY PRECIPITATION AND TEMPERATURE
15.07	6.72	23.43	38.3	دوره آینده Future Period	
				میزان تغییرات در دوره آینده نسبت به دوره گذشته (درصد)	
+1.89	+1.81	+1.96	+1.9	The Amount of Changes in the Future Period Compared to the Past Period	
13.24	4.95	21.53	436.7	دوره گذشته Past Period	بارش و دمای سالانه ANNUAL PRECIPITATION AND TEMPERATURE
15.12	6.76	23.48	459.5	دوره آینده Future Period	
				میزان تغییرات در دوره آینده نسبت به دوره گذشته (درصد)	
+1.88	+2.17	+1.95	+22.7	The Amount of Changes in the Future Period Compared to the Past Period	

بررسی میزان متوسط تغییرات ماهانه و سالانه پارامترهای دما و بارش در روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) نشان داد که بارش ماهانه و سالانه به ترتیب در دوره آینده ۱/۹ و ۲۲/۷ درصد و دمای متوسط ماهانه و سالانه به ترتیب ۱/۸۹ و ۱/۸۸ درصد تغییر خواهد کرد.

نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج حاصل از شاخص‌های آماری محاسبه شده در ابتدا هفت مدل به‌عنوان توانمندترین مدل‌ها در شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش به‌طور جداگانه برای منطقه مشخص شد. نتایج این تحقیق نشان داد که در یک منطقه لزوماً یک مدل یکسان، دقیق‌ترین پیش‌بینی را برای همه پارامترهای اقلیمی ارائه نمی‌دهد و ممکن است بهترین پیش‌بینی برای پارامترهای دما و بارش آن منطقه توسط چند مدل مختلف ایجاد شود. نتایج حاصل از اجرای ترکیبی مدل‌ها نشان داد که مقادیر برآورد شده توسط هر کدام از سه روش اجرای ترکیبی تقریباً نزدیک به هم بوده و تفاوت بسیاری بین آن‌ها دیده نمی‌شود هر چند نتایج دو روش اجرای ترکیبی مدل‌ها با روش وزن‌دهی (MEPWi) و اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) بسیار به هم نزدیک‌تر بودند ولی می‌توان از هر سه روش جهت کاهش عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی استفاده نمود اما روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) تخمین بسیار دقیق‌تری از دما و بارش ارائه نموده است و در نهایت این روش به‌عنوان بهترین روش کاهش عدم قطعیت مدل‌ها برگزیده و جهت کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی‌های دما و بارش در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) استفاده شد. این نتایج نشان داد که استفاده از مجموعه‌ای از مدل‌های مختلف می‌تواند باعث افزایش قابل توجه دقت پیش‌بینی‌های اقلیمی و یا به‌عبارت دیگر کاهش عدم قطعیت‌های مربوطه در مقایسه با استفاده از تنها یک مدل، شود.

نتایج این تحقیق با نتایج تحقیقات پینتو و همکاران (Pinto et al., 2023) مبنی بر کاهش معنی‌دار عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها در مقایسه با استفاده از یک مدل منفرد، سرکوئرا و تورگو (Cerqueira & Torgo, 2023) در خصوص افزایش دقت پیش‌بینی‌ها با استفاده از مدل‌های مختلف، چن و همکاران (Chen et al., 2023) در خصوص بالا بردن دقت نتایج با رویکرد ترکیبی مدل‌ها با استفاده از روش وزن‌دهی، ژو و همکاران (Xu et al., 2019) جهت استفاده از روش‌های اجرای ترکیبی جهت کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها، تحقیقات فو و همکاران (Fu et al., 2005) در رابطه با کاهش معنی‌دار خطای اریبی در شبیه‌سازی بارش و دما توسط اجرای ترکیبی به‌روش وزنی در مقایسه با اجرای منفرد هر مدل فولر و اکستروم (Fowler & Ekström, 2009) مبنی بر کاهش قابل توجه خطای مدل‌ها و در نتیجه کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی بارش مطابقت دارد. همچنین مطابق با نتایج تحقیقات چیلکوتی و همکاران (Chilkoti et al., 2017) در خصوص کاهش عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی با روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) نسبت به سایر روش‌های اجرای ترکیبی مدل‌ها می‌باشد و تأکید می‌نماید که روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) نتایج بهتری را پیش‌بینی نموده و به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. به‌گونه‌ای که صرف استفاده از خروجی یک مدل گردش عمومی جو نمی‌تواند نتایج منطقی برای برنامه‌ریزی‌های مربوط به کاهش اثرات مخرب پدیده تغییر اقلیم در پی داشته باشد و استفاده از مجموعه‌ای از مدل‌های مختلف می‌تواند باعث افزایش قابل توجه دقت پیش‌بینی‌های اقلیمی و یا به‌عبارت دیگر کاهش عدم قطعیت‌های مربوطه در مقایسه با استفاده از تنها یک مدل شود.

References

- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M. E., Barati, M. A., & Rahnama, A. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.023>
- Ashraf, B., Alizadeh, A., Mousavi Baygi, M., & Bannayan Awal, M. (2014). Verification of Temperature and Precipitation Simulated Data by Individual and Ensemble Performance of Five AOGCM Models for North East of Iran. *Water and Soil*, 28(2), 253-266. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.38011>
- Cerqueira, V., & Torgo, L. (2023). Multi-output Ensembles for Multi-step Forecasting. *ArXiv Preprint ArXiv:2306.14563*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.14563>
- Chen, H., Zhang, R., Liu, F., Shao, C., Liu, F., Li, W., ... & Lou, B. (2023). The chromosome-level genome of *Cherax quadricarinatus*. *Scientific Data*, 10(1), 215. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02124-z>
- Chilkoti, V., Bolisetti, T., & Balachandar, R. (2017). Climate change impact assessment on hydropower generation using multi-model climate ensemble. *Renewable Energy*, 109, 510-517. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.041>
- Effron, B., & Tibshirani, R. J. (1993). *An introduction to the bootstrap*. New York: Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9780429246593>
- Fowler, H. J., & Ekström, M. (2009). Multi-model ensemble estimates of climate change impacts on UK seasonal precipitation extremes. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(3), 385-416. <https://doi.org/10.1002/joc.1827>
- Fu, C., Wang, S., Xiong, Z., Gutowski, W. J., Lee, D. K., McGregor, J. L., ... & Suh, M. S. (2005). Regional climate model intercomparison project for Asia. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(2), 257-266. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-257>
- Gao, X., Sokolov, A., & Schlosser, C. A. (2023). A large ensemble global dataset for climate impact assessments. *Scientific Data*, 10, 801. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02708-9>
- Heidari, M., & Khazaei, M. R. (2018). Climate change impact assessment on extreme daily rainfalls in Kermanshah. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 2(7), 27-39. [In Persian] https://journals.srbiau.ac.ir/article_11544.html?lang=en
- Jahangir, M. H., & Azimi, S. M. E. (2022). Evaluating the performance of artificial intelligence models for temperature downscaling (Study area: Ardabil province). *Environmental Sciences*, 20(4), 243-258. [In Persian] <https://doi.org/10.48308/envs.2022.35101>
- Khazaei, M. R., & Khazaei, H. (2018). Scenarios in climate change impact assessment on monthly stream-flow of Karun basin. *Journal of Environmental Sciences and Technology*, 20(1), 29-40. [In Persian]

- Lane, M. E., Kirshen, P. H., & Vogel, R. M. (1999). Indicators of impacts of global climate change on US water resources. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(4), 194-204. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1999\)125:4\(194\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1999)125:4(194))
- Mitchell, T. D. (2003). Pattern scaling: an examination of the accuracy of the technique for describing future climates. *Climatic Change*, 60(3), 217-242. <https://doi.org/10.1023/A:1026035305597>
- Pinto, I., de Perez, E. C., Jaime, C., Wolski, P., van Aardenne, L., Jjemba, E., ... & Tall, A. (2023). Climate change projections from a multi-model ensemble of CORDEX and CMIPs over Angola. *Environmental Research: Climate*, 2(3), 035007. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ace210>
- Semenov, M. A., & Stratonovitch, P. (2010). Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 41(1), 1-14. <https://doi.org/10.3354/cr00836>
- Whetton, P., Hennessy, K., Bates, B., & Kent, D. (2010). Regional Projections and Model Evaluation: Potential Benefits of 'Representative Future Regional Climates'. In Stocker, T., Dahe, Q., Plattner, G. K., Tignor, M., & Midgley, P., *IPCC expert meeting on assessing and combining multi model climate projections*. Paper presented at Proceedings of the National Center for Atmospheric Research, Boulder Colorado, USA(pp105-107). Switzerland: IPCC Working Group. <https://www.ipcc.ch/publication/ipcc-expert-meeting-on-assessing-and-combining-multi-model-climate-projections/>
- Wilby, R. L., & Harris, I. (2006). A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*, 42(2), 1-10. <https://doi.org/10.1029/2005WR004065>
- Wilby, R. L., Tomlinson, O. J., & Dawson, C. W. (2003). Multi-site simulation of precipitation by conditional resampling. *Climate Research*, 23(3), 183-194. <http://www.jstor.org/stable/24868347>
- Xu, K., Xu, B., Ju, J., Wu, C., Dai, H., & Hu, B. X. (2019). Projection and uncertainty of precipitation extremes in the CMIP5 multimodel ensembles over nine major basins in China. *Atmospheric Research*, 226, 122-137. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.04.018>



Spatial Analysis of Soil Erosion and Habitat Quality Based on Land Use Patterns in Sistan Region, Eastern Iran

Mohammad Amin Izadipoor^{a*}, Reza Dahmardeh Behrooz^{b†},

Fatemeh Eynollahi Pir^c, Fatemeh Rajaei^d

^a MSc of Environmental Sciences, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

^b Associate Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

^c Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

^d Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zanjan, Zanjan, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 25 February 2024

Received in revised form
4 May 2024

Accepted: 11 May 2024

Available online:
21 March 2025

KEYWORDS:

Soil erosion,
Habitat quality,
Land use, InVEST,
GWR

ABSTRACT

Soil erosion is a significant environmental issue in terrestrial ecosystems that can impact habitat quality in a region. This study aimed to evaluate soil erosion and habitat quality in the Sistan region, eastern Iran, based on land use patterns. The InVEST model was used to assess soil erosion and habitat quality after collecting the necessary data. The relationship between soil erosion and habitat quality was analyzed using Spearman's correlation test and geographically weighted regression (GWR). The study found that the annual soil erosion in the region was 3.41 Mt (averaging 2.07 t ha⁻¹). Despite having higher quality, the western habitats showed a higher potential for soil erosion. The highest and lowest erosion rates were observed in rangelands (3.6 t ha⁻¹ y⁻¹) and wetlands (0 t ha⁻¹ y⁻¹), respectively. The highest and lowest habitat quality values were seen in rangelands and built-up areas, respectively. Spearman's test revealed a positive and significant correlation between habitat quality and soil erosion ($R = 0.71$, $P\text{-value} < 0.01$). GWR analysis also confirmed a significant spatial correlation between the two variables ($R^2 = 0.91$, $P\text{-value} < 0.01$). The spatial pattern of habitat quality and soil erosion in the study area was similar, with higher-quality habitats located in the western parts of the region, which naturally had a higher potential for erosion. This study provided valuable information on habitat quality and soil erosion and emphasized the importance of managers and planners adopting effective strategies to reduce soil erosion, particularly in high-quality habitats in the region.

*.Corresponding authors:

Mohammad Amin Izadipoor

Email: aminizadi7999@gmail.com

Dr.Reza Dahmardeh Behrooz

Email: dahmardehbehrooz@uoz.ac.ir

How to cite this article: Izadipoor, M. A., Dahmardeh Behrooz, R., Eynollahi Pir, F., & Rajaei, F. (2025). Spatial Analysis of Soil Erosion and Habitat Quality Based on Land Use Patterns in Sistan Region, Eastern Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), pp22-42.
<https://doi.org/10.22067/geoeh.2024.87025.1468>



©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, driven by global warming, poses an existential threat to both natural and human systems, necessitating accurate and reliable projections of future climate variations. While extensive research has examined the impacts of climate change on various subsystems and proposed adaptation and mitigation strategies, many studies have overlooked the inherent uncertainties in climate modeling. Limiting analyses to selected scenarios from Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCMs) and neglecting uncertainty analysis reduces the credibility and certainty of the final results. Indeed, uncertainties arising from structural and parametric diversity in models, downscaling processes, and impact assessment models require rigorous investigation and quantification.

A comprehensive assessment of climate change impacts requires the identification and analysis of three primary categories of uncertainty:

1. Uncertainties associated with the structure and parameters of AOGCMs;
2. Uncertainties arising from statistical and dynamical downscaling methods at regional scales; and
3. Parametric and structural uncertainties in impact assessment models.

AOGCMs, due to their diversity in structure and parameters, produce varying outputs for climatic variables, representing a significant source of uncertainty in climate projections. Incorporating uncertainties into climate change impact assessments leads to various plausible future scenarios that can inform decision-making and adaptation planning. Given computational and data limitations, a comprehensive examination of all uncertainty sources in every study is infeasible. However, studies have shown that certain uncertainties, such as those related to downscaling methods, significantly impact the final results and must be considered in assessing climate change impacts on river flows. Employing multi-model ensemble approaches and ensemble prediction methods to quantify and reduce uncertainties arising from AOGCMs is an effective strategy adopted in this research.

Material and Method

The Qarasu watershed, located in western Iran within Kermanshah province, served as the focal point of this study. Observational data spanning 1976–2005 were obtained from the Kermanshah synoptic station, courtesy of the Iran Meteorological Organization. Complementing this, downscaled data from 21 Global Circulation Models (GCMs) were acquired from the NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP) dataset. This dataset encompassed both the historical (1976–2005) and future (2020–2049) periods under the Representative Concentration Pathway 4.5 (RCP4.5) scenario, selected for its intermediate climate change trajectory.

Following meticulous data validation and preprocessing, the uncertainty inherent in the GCMs was rigorously assessed. To evaluate GCM performance, the coefficient of determination (R^2) and Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) were computed, facilitating a comparative analysis between simulated temperature and precipitation under RCP4.5 and observed values from the Kermanshah synoptic station.

To address and mitigate uncertainties in climate projections, this research employed a suite of ensemble methods, including ensemble prediction (EP), multi-model ensembles (MEP), and weighted multi-model ensembles (MEPWi), rather than relying solely on individual model

outputs. The fundamental premise underpinning these methods is that models demonstrating superior skill in replicating historical climate patterns are anticipated to maintain their relative accuracy in future projections, thereby identifying them as optimal candidates. Consequently, the weight assigned to each model within the ensemble is directly proportional to its historical performance. Finally, the accuracy of the model simulations relative to observational data was evaluated using R^2 and NSE.

Results and Discussion

The findings indicated that MRI-CGCM3, MPI-ESM-LR, BNU-ESM, ACCESS1-0, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, and MPI-ESM-MR exhibited robust performance in simulating monthly precipitation patterns. Concurrently, ACCESS1-0, CNRM-CM5, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, and BNU-ESM demonstrated heightened accuracy in replicating temperature regimes. Notably, MRI-CGCM3, MPI-ESM-MR, and MIROC-ESM-CHEM were assigned the highest weights and exhibited the lowest uncertainty in their simulations of monthly precipitation, maximum temperature, and minimum temperature, signifying their superior fidelity and minimal deviation.

Analysis of statistical metrics from the ensemble methods revealed that the multi-model ensemble prediction (MEP) approach, characterized by an R^2 of 0.95 and NSE of 0.92, provided the most congruent estimates compared to baseline data from the Kermanshah synoptic station. Consequently, the MEP method was adjudicated as the optimal ensemble prediction paradigm for GCMs in this study.

Scrutiny of mean monthly and annual fluctuations under the MEP framework projected that:

- Monthly and annual precipitation are anticipated to change by 1.9% and 22.7%, respectively, in the future period.
- Mean monthly and annual temperature increments are projected to be 1.89°C and 1.88°C, respectively.

Conclusions

This study examined and compared various climate modeling methodologies to mitigate uncertainty in climate projections. Our findings reveal that no single climate model accurately predicts all climatic parameters within a given region. Optimal projections for temperature and precipitation necessitate the utilization of multiple models, underscoring the importance of multi-model ensemble techniques. We evaluated three ensemble methods: Model Ensemble with Weighting (MEPWi), Model Ensemble Projection (MEP), and Ensemble Prediction (EP). The results indicated that projected values from these methods were relatively consistent, with minimal discernible differences. However, the MEP method yielded the most precise estimates for temperature and precipitation, establishing it as the superior technique for reducing uncertainty in climate projections. This research emphasizes that leveraging diverse climate models significantly enhances projection accuracy and reduces uncertainties. Relying solely on a single GCM is insufficient for formulating robust strategies to mitigate climate change impacts. Our results align with prior research demonstrating the efficacy of multi-model ensembles in improving predictive accuracy.

In summary, this study demonstrates that applying climate model ensemble techniques, particularly the MEP method, substantially improves the reliability of climate projections. This enhanced precision is crucial for enabling policymakers and planners to make informed decisions aimed at mitigating climate change impacts. Future studies could explore the performance of these ensemble methods under different climate scenarios and in other regions.



تحلیل مکانی فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌ها بر مبنای الگوی کاربری اراضی در منطقه سیستان

محمدامین ایزدی پور^{۱*}، رضا دهمرده بهروز^۲، فاطمه عین‌اللهی پیر^۳، فاطمه رجائی^۴

*دانشجوی کارشناسی ارشد محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

^۲دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

^۳استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

^۴استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲ کلمات کلیدی: فرسایش خاک کیفیت زیستگاه‌ها کاربری اراضی اینوست رگرسیون وزنی مکانی	فرسایش خاک یکی از جدی‌ترین مشکلات محیط‌زیستی در اکوسیستم‌های خشکی است که می‌تواند کیفیت زیستگاه‌های یک منطقه را تحت تأثیر قرار دهد. این مطالعه با هدف ارزیابی فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌های سیستان بر مبنای الگوی کاربری اراضی انجام گردید. پس از تهیه داده‌های مورد نیاز، مدلسازی فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌ها با استفاده از مدل اینوست (InVEST) و ارتباط میان آنها بر اساس آزمون همبستگی اسپیرمن و رگرسیون وزنی مکانی (GWR) صورت پذیرفت. نتایج نشان داد فرسایش سالانه خاک در منطقه در مجموع ۳/۴۱ میلیون تن (بطور میانگین معادل ۲/۰۷ تن در هکتار) بود. زیستگاه‌های بخش غربی منطقه با وجود داشتن کیفیت بیشتر از پتانسیل فرسایش خاک بالاتری نیز برخوردار بودند. بیشترین و کمترین میزان فرسایش به ترتیب در مراتع (۳/۶ تن در هکتار) و تالاب (۰ تن در هکتار) و بالاترین و کمترین میزان کیفیت زیستگاه‌ها به ترتیب در مراتع و ساخته‌شده‌ها مشاهده گردید. آزمون اسپیرمن رابطه مثبت و معنادار کیفیت زیستگاه‌ها با فرسایش خاک را نشان داد ($R=0.71$, $P\text{-value}<0.01$). نتایج GWR نیز همبستگی مکانی معنادار بین آنها را تأیید کرد ($R^2=0.91$, $P\text{-value}<0.01$). الگوی مکانی کیفیت زیستگاه‌ها و

فرسایش خاک در منطقه مطالعاتی تقریباً مشابه است بطوریکه زیستگاه‌های با کیفیت بالاتر در بخش غربی منطقه واقع شده‌اند، ضمن آنکه همین بخش‌ها بطور طبیعی از پتانسیل فرسایش بیشتری برخوردار هستند. نتایج این مطالعه علاوه بر ارائه اطلاعات مفید در مورد کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک، ضرورت توجه مدیران و برنامه‌ریزان را برای اتخاذ راهبردهای مناسب به منظور کاهش فرسایش خاک بخصوص در زیستگاه‌های با کیفیت مطلوب‌تر در منطقه مشخص می‌سازد.

مقدمه

فرسایش خاک یکی از جدی‌ترین مشکلات محیط‌زیستی حال حاضر در جهان است که تحت تأثیر عوامل طبیعی مانند آب و هوا، شکل زمین و ویژگی‌های خاک و عوامل انسانی مانند تغییرات کاربری اراضی اتفاق می‌افتد (Obiahu & Elias, 2020; Dou et al., 2022; Gomiero, 2016). این فرآیند به طور مستقیم بر توسعه، بهره‌برداری و حفاظت از منابع آب و خاک یک منطقه اثرگذار است و در نهایت منجر به تخریب بهره‌وری زمین می‌شود (Qiao et al., 2023).

برای ارزیابی فرسایش خاک مدل‌ها و ابزارهای مختلفی از جمله پروژه پیش‌بینی فرسایش آبی (WEPP)^۱، ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT)^۲، معادله جهانی تلفات خاک (USLE)^۳، معادله جهانی اصلاح شده تلفات خاک (RUSLE)^۴ و مدل نسبت تحویل رسوب اینوست (SDR-InVEST)^۵ توسعه یافته‌اند (Ahmadi Mirghaedi, Sour, Mohammadzadeh, Salmanmahiny & Mirkarimi, 2018; Li & Shi, 2024). مدل RUSLE یک مدل تجربی پیش‌بینی فرسایش خاک است که کاربرد و قابلیت اطمینان آن در مطالعات قبلی در دهه‌های گذشته تأیید شده است (Alewell, Borrelli, Meusburger & Panagos, 2019). در دهه اخیر، مدل SDR-InVEST که مبتنی بر RUSLE است، به ابزاری مهم برای ارزیابی نگهداشت و تولید رسوب و فرسایش خاک، در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی در سطح بین‌المللی تبدیل شده است (Qiao et al., 2023; Li & Shi, 2024). درخشان بابائی و همکاران (Derakhshan Babaei, Nosrati, Mirghaedi & Egli, 2021) فرسایش خاک در حوضه آبخیز کن در استان تهران را با استفاده از مدل SDR-InVEST حدود ۷ تن در هکتار در سال برآورد کردند. همچنین آنسی و همکاران (Aneseyee, Noszczyk, Soromessa & Elias, 2020b) اثر تغییرات کاربری بر فرسایش خاک را با استفاده از مدل SDR-InVEST در حوضه آبخیز ونیکه در اتیوپی ارزیابی کردند. آنها دریافتند که مزارع زیر کشت نسبت به علفزار، بوته زار، جنگل و اراضی بایر بالاترین نرخ فرسایش خاک را داشتند که از ۱۰/۰۲ تن در هکتار در سال ۱۹۸۸ به ۴۳/۴۸ تن در هکتار

1 Water Erosion Prediction Project

2 Soil and Water Assessment Tool

3 Universal Soil Loss Equation

4 Revised Universal Soil Loss Equation

5 Sediment Delivery Ratio - Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs

در سال ۲۰۱۸ افزایش یافت. در مطالعه دیگری تووبال و همکاران (Toubal, Achite, Ouillon & Dehni, 2018) میزان از دست دادن خاک در حوضه وادی صحوات در الجزایر را با استفاده از مدل RUSLE بین صفر تا ۲۵۵ تن در هکتار در سال برآورد کردند. زارع و همکاران (Zare, Panagopoulos & Loures, 2017) نیز تأثیر تغییر کاربری اراضی بر میزان فرسایش خاک در حوضه کسلیان ایران را ارزیابی کردند. آنها نشان دادند که تغییر کاربری اراضی از جنگل به سکونتگاه‌ها مهم‌ترین عامل فرسایش ناشی از تغییر کاربری زمین در منطقه مورد مطالعه‌شان بوده است.

از جمله مهمترین اثرات فرسایش خاک، آسیب رساندن به اکولوژی و کیفیت زیستگاه‌های یک منطقه است (Qiao et al., 2023). کیفیت زیستگاه یکی از مهمترین خدمات اکوسیستمی حمایتی است که پتانسیل یک اکوسیستم را در ایجاد شرایط مناسب برای بقاء و پایداری گونه‌ها و جمعیت‌ها بیان می‌کند و تا حدودی به عنوان شاخصی برای انعکاس تنوع زیستی منطقه‌ای در نظر گرفته می‌شود (Sharp et al., 2015). در دهه‌های اخیر، افزایش فعالیت‌های انسانی موجب تکه‌تکه شدن زیستگاه، انقراض گونه‌های انبوه و تهاجم گونه‌های بیگانه شده است که منجر به تخریب کیفیت زیستگاه و کاهش تنوع زیستی شده است. تغییرات کاربری زمین منجر به تفاوت‌های قابل توجهی در ساختار داخلی، فرآیندها و عملکرد اکوسیستم‌ها می‌شود که علت اصلی تخریب و از دست دادن کیفیت زیستگاه است. بنابراین، بررسی کیفیت زیستگاه و تغییرات آن پیشنهادی برای امنیت اکوسیستم‌های منطقه‌ای است (Lei et al., 2022).

با پیشرفت علم محیط زیست، مدل‌های ارزیابی زیستگاه‌ها از جمله مدل‌های کیفیت زیستگاه اینوست (Habitat Quality of InVEST) ^۱، شاخص تناسب زیستگاه (HSI) ^۲، ارزش‌های اجتماعی برای خدمات اکوسیستمی (SolVES) ^۳ و مدل‌های یکپارچه خدمات اکوسیستمی نیز توسعه داده شده‌اند (Wei et al., 2022; Lei et al., 2022).

در این بین، مدل کیفیت زیستگاه اینوست از جمله پرکاربردترین و محبوب‌ترین مدل به شمار می‌رود چرا که روشی ساده برای ارزیابی کیفیت زیستگاه در مکان‌هایی با داده‌های محدود و نمونه‌برداری نشده، ارائه می‌دهد (Wei et al., 2022). علاوه، از تهدیدات زیستگاه و کاربری زمین برای تخمین کیفیت زیستگاه استفاده می‌کند که کارآمدتر و دقیق‌تر است و مزایای زیادی در محاسبه کیفیت زیستگاه در بازه‌های طولانی مدت دارد (Gong, Xie, Cao, Huang & Li, 2019). تاکنون، این مدل برای مطالعه کیفیت زیستگاه در مقیاس‌ها و مکان‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. پو و همکاران (Pu, Shen, Liu & Wen, 2024) کیفیت زیستگاه‌های حوضه دریاچه تایهو در چین را با استفاده از مدل اینوست ارزیابی کردند. آنها اذعان داشتند که با تغییر کاربری در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ در منطقه مورد مطالعه‌شان، کیفیت زیستگاه‌های آن کاهش یافته است (Ahmadi Mirghaed & Souri, 2022). زیستگاه‌های حوضه آبخیز رودخانه تلوک در استان خوزستان را با استفاده از مدل کیفیت زیستگاه اینوست مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نشان دادند که

1 Habitat Quality of InVEST

2 Habitat Suitability Index

3 Social Values for Ecosystem Services

کیفیت زیستگاه‌های واقع در شمال و شرق منطقه نسبت به دیگر بخش‌ها بسیار بیشتر است. بعلاوه، زیستگاه‌های جنگلی دارای کیفیت بالاتری نسبت به دیگر زیستگاه‌های حوضه دارد. در مطالعه دیگری آنسیی و همکاران (Aneseyee, Elias, Soromessa & Feyisa, 2020a) از مدل کیفیت زیستگاه اینوست برای تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی - زمانی کیفیت زیستگاه در انواع مختلف کاربری در حوضه وینک در اتیوپی استفاده نمودند.

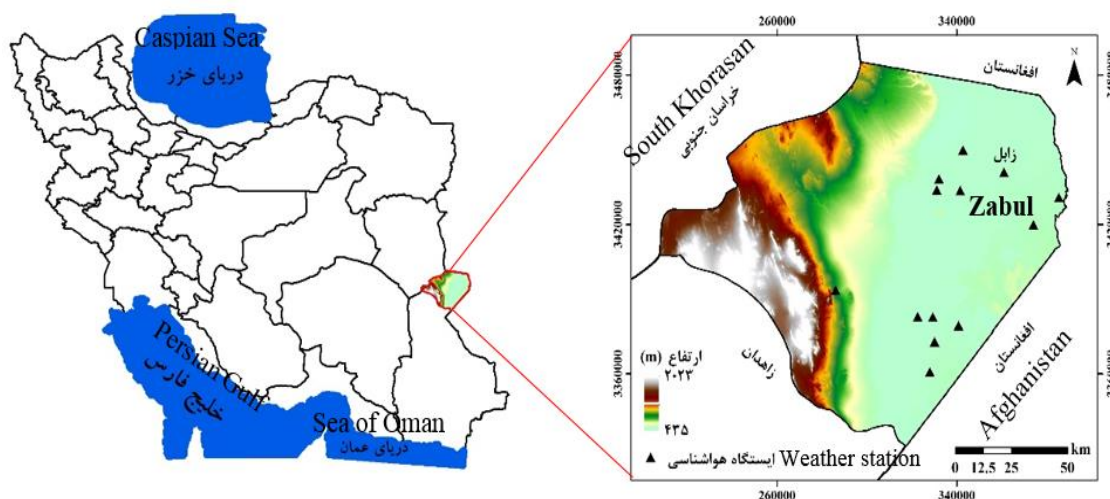
وو و همکاران (Wu, Sun & Fan, 2021) نیز رابطه تغییرات مکانی - زمانی کیفیت زیستگاه‌های منطقه خلیج گوانگدونگ - هنگ کنگ در ماکائو را با استفاده از مدل اینوست در بازه زمانی ۱۹۹۵-۲۰۱۵ مورد مطالعه قرار دادند. نعمت‌الهی و همکاران (Nematollahi, Fakheran, Kienast, Pourmanafi & Jafari, 2021) کیفیت زیستگاه گونه‌های قوچ و میش اصفهان، پلنگ و خرس قهوه‌ای را با استفاده از مدل اینوست در استان چهار محال و بختیاری مدل‌سازی و ارتباط آن را با اثرات بوم‌شناختی شبکه جاده‌ای ارزیابی کردند. آنها با استفاده از نقشه‌های به‌دست آمده، درجه آسیب‌پذیری مناطق حفاظت‌شده را تعیین و راهکارهایی در راستای کاهش اثرات منفی شبکه جاده‌ای ارائه دادند.

مطالعات مختلفی در مورد کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک انجام شده است. با این وجود، ارتباط و برهمکنشی بین آنها بویژه در مناطق با اقلیم خشک بندرت مورد توجه قرار گرفته است. کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک هر دو تحت تأثیر عوامل مشترک بویژه تغییرات کاربری اراضی قرار می‌گیرند. علاوه بر این، یک رابطه متقابل تأثیرگذاری و تأثیرپذیری بین آنها وجود دارد. به همین منظور، این مطالعه با هدف ارزیابی ارتباط بین کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک بر مبنای الگوی کاربری اراضی در سیستان انجام شد. سیستان یک منطقه استراتژیک و مهم در شرق کشور است که دارای اقلیم گرم و خشک می‌باشد. تداوم خشکسالی‌های متعدد و تغییرات کاربری اراضی در دهه‌های اخیر، باعث تشدید فرسایش خاک در این منطقه شده است و کیفیت زیستگاه‌های آن را نیز تحت تأثیر قرار داده است. با وجود چنین مسائلی، تاکنون تحقیقی در خصوص ارزیابی کیفیت زیستگاه‌ها در ارتباط با فرسایش خاک در این ناحیه صورت نگرفته است. ارزیابی کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک در این منطقه می‌تواند اطلاعات مفیدی درباره شرایط محیط‌زیستی منطقه ارائه دهد که برای اتخاذ راهبردهای مدیریتی محیط‌زیست منطقه حائز اهمیت است. بر این اساس، این تحقیق با توجه به اهداف زیر انجام شد: (الف) مدل‌سازی فرسایش خاک بر مبنای الگوی کاربری اراضی در سیستان با استفاده از مدل نسبت تحویل رسوب اینوست، (ب) ارزیابی کیفیت زیستگاه‌های منطقه مطالعاتی بر مبنای الگوی کاربری اراضی و با استفاده از مدل کیفیت زیستگاه اینوست و (ج) ارزیابی ارتباط و الگوی مکانی بین فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌ها در منطقه مطالعاتی.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

سیستان با مساحتی حدود ۱۶۴۵۹ کیلومتر مربع واقع شده در محدوده مختصات جغرافیایی $۵۹^{\circ} ۵۶' ۱۶''$ تا $۶۱^{\circ} ۵۰' ۱۹''$ طول شرقی و $۳۰^{\circ} ۶' ۱۷''$ تا $۳۱^{\circ} ۲۹' ۸''$ عرض شمالی در خاور ایران، شهرستان‌های زابل، زهک، هامون، هیرمند و نیمروز را شامل می‌شود (شکل ۱). بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه، این منطقه دارای اقلیم گرم و خشک است و میانگین دما و بارش سالیانه آن به ترتیب ۲۲ درجه سانتیگراد و ۶۶ میلیمتر می‌باشد. متوسط ارتفاع از سطح دریا و شیب سرزمین در منطقه به ترتیب ۶۷۹ متر و ۶ درصد است. مناطق دشتی و هموار بخش‌های خاوری و ارتفاعات بلند بخش‌های غربی منطقه را در بر گرفته‌اند. کاربری‌های غالب در منطقه شامل کشاورزی و مرتع می‌باشد. وجود تالاب هامون و پناهگاه حیات وحش هامون در این منطقه اهمیت اکولوژیک زیستگاه‌های آن را برای گونه‌های جانوری (شامل ۳۰ گونه پستاندار، ۱۸۳ گونه پرنده، ۴۴ گونه خزنده، ۷ گونه دوزیست و ۲۲ گونه ماهی) و گیاهان مختلف (شامل گیاهان ماسه‌دوست، شورپسند و مقاوم به خشکی) محرز ساخته است (Department of Environment Islamic Republic of Iran, 2023). با توجه به شرایط خشکسالی و وجود بادهای ۱۲۰ روزه در این منطقه، احتمال افزایش فرسایش خاک، دور از انتظار نیست. تداوم خشکسالی‌های متعدد و تغییرات کاربری اراضی در دهه‌های اخیر، موجب افت سطح آبهای زیرزمینی و خشک شدن قنات‌های موجود در منطقه شده است که در نتیجه آن فرسایش خاک تشدید و کیفیت زیستگاه‌های منطقه نیز تحت تأثیر قرار گرفته است. شکل ۲ نمونه‌هایی از وضعیت محیط‌زیست کنونی منطقه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی سیستان در ایران
Fig.1. Geographical location of Sistan in Iran



شکل ۲- نمونه‌هایی از شرایط محیط‌زیستی منطقه سیستان

Fig.2. Examples of environmental conditions in the Sistan region

جمع‌آوری و تهیه داده‌ها

در این مطالعه داده‌های مختلفی شامل مدل رقومی ارتفاعی، کاربری اراضی، ویژگی‌های خاک، داده‌های اقلیمی و پوشش گیاهی تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌های موردنیاز بر اساس پردازش تصاویر لندست در سامانه گوگل ارث انجین، گزارشات موجود و بازدیدهای میدانی تهیه شدند. مدل رقومی ارتفاعی از داده‌های SRTM¹ و ویژگی‌های بافت و ماده آلی خاک از داده‌های جهانی خاک استخراج شدند. نقشه کاربری اراضی بر اساس تصاویر چندطیفی سنجنده OLI² ماهواره لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۲۲ و با استفاده از روش جنگل تصادفی پردازش و تهیه گردید. داده‌های میانگین بارندگی ماهانه و سالانه منطقه بر اساس آمار ۱۳ ایستگاه هواشناسی موجود در منطقه (ایستگاه‌های هواشناسی زابل، زهک، بنجار، ادیمی، ژاله‌ای، جزینک، چرک، کوه خواجه، محمدشاه کرم، محمدآباد بولایی، شهرگ گلخانی، شهر سوخته و تیمورآباد) و داده‌های اقلیمی TerraClimate نقشه‌سازی شدند. شاخص نرمال شده تفاوت گیاهی (NDVI³) نیز بر اساس باندهای قرمز و مادون قرمز ماهواره لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۲۲ و با استفاده از معادله ۱ در سامانه گوگل ارث انجین محاسبه گردید (Rouse, Haas, Schell & Deering, 1974).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

رابطه (۱)

1 Shuttle Radar Topography Mission

2 Operational Land Imager

3 Normalized Difference Vegetation Index

مدلسازی فرسایش خاک

فرسایش خاک در منطقه مطالعاتی با استفاده از مدل نسبت تحویل رسوب اینوست (SDR-InVEST) ارزیابی گردید. مبنای این مدل معادله اصلاح شده تلفات خاک (RUSLE) مطابق با فرمول ۲ است که ورودی‌های آن شامل مدل رقومی ارتفاعی، قدرت فرساینده‌ی باران، فاکتورهای پوشش گیاهی و مدیریتی سرزمین، میزان فرسایش‌پذیری خاک و نقشه کاربری اراضی است (Sharp et al., 2015).

$$E = R \times K \times LS \times C \times P \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن E، R، K، LS، C و P به ترتیب میزان فرسایش خاک ($t\ y^{-1}$)، فرساینده‌ی باران ($MJ\ mm\ (ha\ hr)^{-1}$)، فرسایش‌پذیری خاک ($(t\ ha\ hr\ (MJ\ ha\ mm)^{-1})$)، فاکتور طول و امتداد شیب، عامل پوشش گیاهی و فاکتور مدیریتی سرزمین را نشان می‌دهند. در این مطالعه، فاکتور R بر اساس شاخص فورنیه مطابق با معادلات ۳ و ۴ محاسبه گردید. فاکتور K بر اساس ویژگی‌های خاک و معادله ۵ و فاکتور C بر مبنای معادله ۶ سنجیده شدند. فاکتور P نیز بر اساس نقشه‌های کاربری ارضی و شیب و مطابق با جدول ۱ بدست آمد. با معرفی مدل رقومی ارتفاعی منطقه به مدل SDR-InVEST، فاکتور LS نقشه‌سازی می‌شود (Sharp et al., 2015; Derakhshan Babaei et al., 2021).

$$F = \sum_{i=1}^{12} p_i^2 / Pr \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$R = \begin{cases} (0.07397F^{1.847}) & \text{if } F < 55\ mm \\ (95.77 - 6.081F + 0.477F^2) & \text{if } F \geq 55\ mm \end{cases} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن F، Pr و p_i به ترتیب شاخص فورنیه، میانگین بارندگی ماهانه و میانگین بارندگی سالانه را نشان می‌دهند (Renard & Freimund, 1994).

$$K = \left(0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256SA \frac{(1-SI)}{100} \right] \right) \left(\frac{SI}{CL+SI} \right)^{0.3} \left(1.0 - \frac{0.25OC}{OC + \exp(3.72 + 2.9OC)} \right) \left(1.0 - \frac{0.7(1-\frac{SA}{100})}{(1-\frac{SA}{100}) + \exp(-5.51 + 22.9(1-\frac{SA}{100}))} \right) \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن SA، SI، CL و OC به ترتیب درصد شن، سیلت، رس و کربن آلی خاک را بیان می‌کنند (Sun, Shao, Liu & Zhai, 2014).

$$C = \exp[-\alpha(NDVI/\beta - NDVI)] \quad \text{رابطه (۶)}$$

α و β ضرایب ثابت به ترتیب برابر ۲ و ۱ هستند (Van der Knijff, Jones & Montanarella, 2000).

جدول ۱- ارزش فاکتور P بر اساس کلاس‌های شیب

Table 1- P-factor value based on slope classes (Smith & Wischmeier, 1962)

کلاس شیب Slope class	<3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-20	20-25	>25
فاکتور P factor P	0/6	0/5	0/5	0/6	0/7	0/8	0/9	1

ارزیابی کیفیت زیستگاه‌ها

مدل کیفیت زیستگاه اینوست (HQ-InVEST) به منظور ارزیابی کیفیت زیستگاه‌های منطقه مطالعاتی مدنظر قرار گرفت. این مدل کیفیت زیستگاهی را با توجه به معادله ۷ برآورد می‌کند و ورودی‌های آن شامل نقشه کاربری اراضی، زیستگاه‌ها و عوامل تهدید است. در این راستا، پنج عامل باید مورد توجه قرار گیرد که شامل فاصله اثرگذاری و روند تهدید، ارزش زیستگاهی، اهمیت منابع تهدید، حساسیت زیستگاه‌ها به منابع تهدید و سطح اقدامات حفاظتی می‌باشد. فاصله اثرگذاری منبع تهدید بر یک زیستگاه خاص بر حسب کیلومتر در نظر گرفته می‌شود و تغییرپذیری آن در فضا بصورت نمایی یا خطی تعریف می‌شود. سه عامل ارزش زیستگاهی، اهمیت منابع تهدید و حساسیت زیستگاه‌ها به منابع تهدید با توجه به شرایط منطقه و بر اساس نظرات کارشناسی و منابع علمی در مقیاس صفر تا ۱ ارزشگذاری می‌شوند. در این مطالعه عوامل مذکور مطابق با جدول ۲ تعریف شدند. سطح اقدامات حفاظتی نیز با توجه به نوع مدیریت و وجود مناطق حفاظت شده در منطقه در مقیاس صفر تا ۱ ارزشگذاری می‌شود و به صورت یک لایه وکتوری به مدل معرفی می‌گردد (Sharp et al., 2015; Ahmadi Mirghaied & Souri, 2022).

$$Q_{xj} = H_j (1 - (D_{xj}^z / D_{xj}^z + k^z)) \quad \text{رابطه (۷)}$$

Q_{xj} ، H_j و D_{xj} به ترتیب بیانگر کیفیت زیستگاه، ارزش مطلوبیت زیستگاهی و سطح تخریب کلی در پیکسل x با کاربری j هستند. z ضریبی برابر با ۲/۵ است. K ثابت نیم اشباع است که کالیبراسیون مدل بر مبنای آن انجام می‌شود. K به طور پیش فرض برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود و با یکبار اجرای مدل، نصف بیشترین مقدار ارزش تخریب برای آن منظور می‌شود (Sharp et al., 2015; He, Huang & Li, 2017).

جدول ۲ - ارزش‌های تعیین شده برای زیستگاه‌ها، منابع تهدید و حساسیت زیستگاه‌ها به منابع تهدید

Table 2- Values assigned to habitats, sources of threat, and sensitivity of habitats to sources of threat

وزن تهدید Threat weight	روند تغییرات تهدید Threat trends	حداکثر فاصله اثرگذاری تهدید The maximum effective (km) distance of the threat	زیستگاه‌ها Habitat						منابع تهدید Sources of threat
			تالاب Wetlands	مرتع Meadows	اراضی بایر Barren lands	شوره‌زار Salt marshes	کشاورزی Agriculture	ساخته شده Made	
0/9	خطی Linear	6	0/8	0/6	0/5	0/1	0/1	0	ساخته شده Made
0/7	خطی Linear	6	0/9	0/7	0/5	0/1	0/5	0	کشاورزی Agriculture
0/9	خطی Linear	6	0/7	0/8	0/6	0/6	0/5	0	جاده و راه Road and path
			0/9	0/7	0/5	0/3	0/3	0/1	ارزش زیستگاهی Habitat value

تحلیل‌های آماری

منطقه مطالعاتی با استفاده از ماژول شبکه‌بندی^۱ در نرم افزار ArcGIS 10.7 زون‌بندی و میانگین فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌ها برای هر زون محاسبه گردید. ارتباط و همبستگی بین فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌ها با استفاده از آزمون همبستگی اسپیرمن در محیط SPSS و رگرسیون وزنی مکانی^۲ (GWR) در نرم افزار ArcGIS 10.7 در سطح زون‌های مورد نظر مورد سنجش قرار گرفت.

نتایج و بحث

نقشه‌های فرسایش‌پذیری باران (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، طول و امتداد شیب (LS)، عامل پوشش گیاهی (C) و فاکتور مدیریتی (P) در شکل ۳ نشان داده شده است. ارزش‌های میانگین، حداقل و حداکثر برای فاکتور $R \text{ (MJ mm (ha hr)}^{-1})$ به ترتیب ۷/۹۹، ۴/۸ و ۱۲/۸ برآورد گردید. به همین منوال، برای فاکتور $K \text{ (t ha hr (MJ ha mm)}^{-1})$ به ترتیب ۰/۱۵، ۰/۱۲ و ۰/۱۷، برای فاکتور LS به ترتیب ۳/۲، ۰/۰۳ و

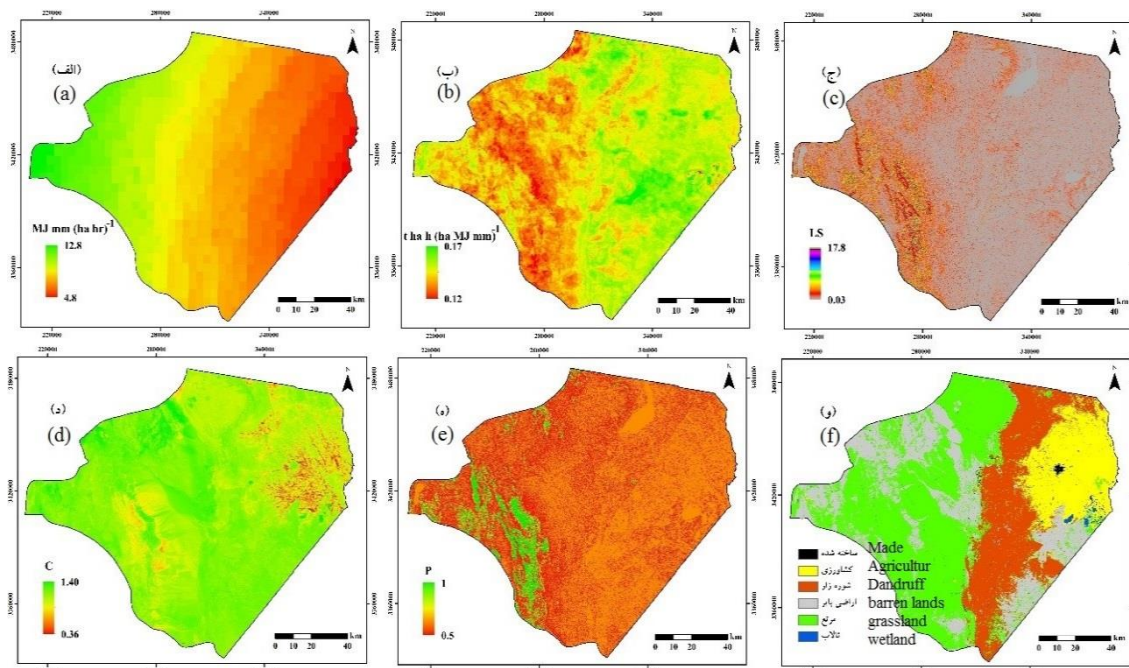
1 Tessellation

2 Geographically Weighted Regression

۱۷/۸، برای فاکتور C به ترتیب ۰/۹۲، ۰/۰۳ و ۱/۴ و برای فاکتور P به ترتیب ۰/۵۹، ۰/۵ و ۱ محاسبه شد. این نتایج با دیگر مطالعات انجام شده در ایران تا حدود زیادی سنخیت دارد. صادقی و همکاران (Sadeghi, Zabihi, Vafakhah & Hazbavi, 2017) میزان فاکتور R در دوره بازگشت ۵۰ ساله برای کل ایران را بین ۰/۷۹ تا ۷۸/۵ برآورد کردند. میرقائد و سوری (Mirghaed & Souri, 2023) مقدار فاکتورهای R، K و C را در حوضه آبخیز رودخانه شور در استان خوزستان، جنوب غرب ایران به ترتیب بین ۶/۳ تا ۱۰۰۶ $(MJ\ mm\ (ha\ hr)^{-1})$ ، ۰/۰۹ تا ۰/۵ $(t\ ha\ hr\ (MJ\ ha\ mm)^{-1})$ و ۰ تا ۲/۱ برآورد کردند. احمدی میرقائد و همکاران (Ahmadi Mirghaed, Rahmani & Molla Aghajanzadeh, 2025) میانگین فاکتورهای R، K، LS و P برای حوضه آبخیز تجن در استان مازندران را به ترتیب ۳۰۷، ۰/۱۶، ۴۶ و ۰/۸۴ محاسبه کردند.

نقشه کاربری اراضی بر اساس تصاویر لندست ۸ و با استفاده از روش جنگل تصادفی در گوگل ارث انجین تهیه و طبقه‌بندی گردید (شکل ۳). در این رابطه، ضریب کاپا و صحت کلی به ترتیب ۰/۹۱ و ۹۴٪ بدست آمد که صحت و اعتبار طبقه‌بندی را تأیید می‌کند. نتایج نشان داد که ساخته‌شده‌ها، کشاورزی، شوره‌زار، اراضی بایر، مراتع و تالاب به ترتیب ۷۱۱۰، ۲۵۴۰۴۶، ۳۶۰۹۸۴، ۳۴۶۳۸۷، ۶۷۴۳۲۱ و ۲۹۸۴ هکتار از سطح منطقه را دربرگرفته‌اند.

شکل ۴ نقشه فرسایش خاک بر اساس مدل اینوست را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن بود که فرسایش خاک در منطقه در مجموع معادل ۳/۴۱ میلیون تن در سال است که بین ۰/۱ تا ۵۵/۶ تن در هکتار متغیر می‌باشد و بطور میانگین معادل ۲/۰۷ تن در هکتار در سال برآورد گردید. این نتیجه با نتایج مطالعات انجام شده توسط درخشان بابائی و همکاران (Derakhshan Babaei et al., 2021) در حوضه آبخیز کن در استان تهران، احمدی میرقائد و همکاران (Ahmadi Mirghaed et al., 2018) در حوضه آبخیز گرگان، محمودی و نقشبندی (Mahmoodi & Naghshbandi, 2020) در حوضه آبخیز سد گاوشان و نژاد افزلی و همکاران (Nezhadafzali, Shahrokhi & Bayatani, 2019) در حوضه آبخیز دهکهان جنوب کرمان مطابقت دارد. جدول ۳ نیز نتایج مساحت اختصاص یافته به طبقات مختلف فرسایش خاک را نشان می‌دهد. مشخص گردید که طبقات فرسایش خیلی کم، کم، متوسط، شدید و خیلی شدید به ترتیب ۶۰، ۱۴، ۱۰، ۴ و ۱۲ درصد از سطح منطقه را شامل می‌شوند. طبقات فرسایش شدید و خیلی شدید اغلب در نیمه غربی منطقه وجود دارند که بیانگر پتانسیل بیشتر فرسایش خاک در این پهنه‌هاست. وجود شیب‌های تند، توپوگرافی متغیر، پوشش گیاهی پراکنده و فرساینده‌گی بیشتر باران عوامل مهمی در افزایش فرسایش خاک در بخش‌های غربی محسوب می‌شوند.

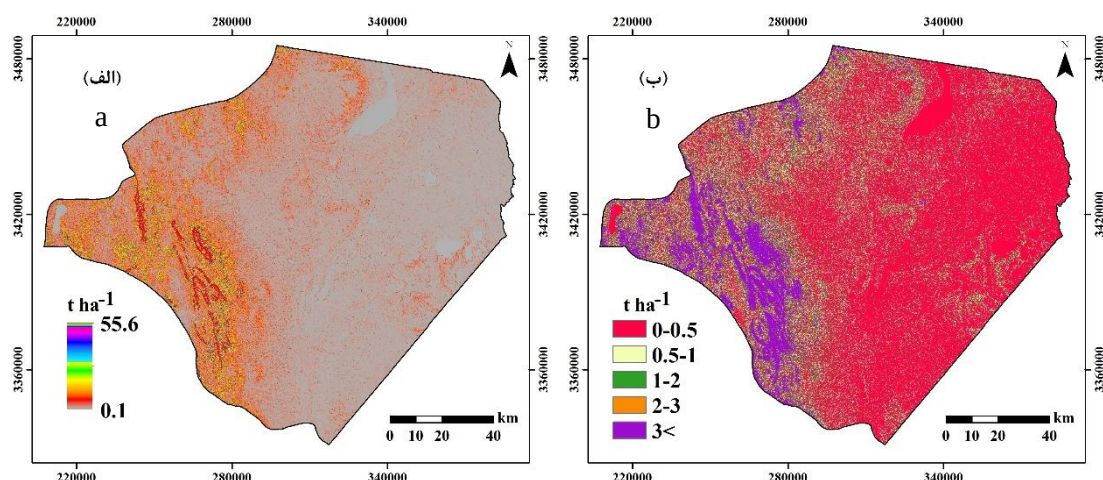


شکل ۳- نقشه‌های (الف) فرساینده‌ی باران، (ب) فرسایش‌پذیری خاک، (ج) طول و امتداد شیب، (د) عامل

پوشش گیاهی، (ه) فاکتور مدیریت سرزمین و (و) کاربری اراضی

Fig.3. Maps of (a) rain erosion, (b) soil erodibility, (c) slope length and extension, (d) vegetation factor, (e) land management factor, and (f) land use.

نتایج نشان داد که میزان فرسایش سالانه در کاربری‌های ساخته شده، کشاورزی، شورزار، اراضی بایر، مراتع و تالاب به ترتیب ۰/۴، ۰/۳، ۰/۴، ۲/۱، ۳/۶ و صفر تن در هکتار است (جدول ۴). بر این اساس، بیشترین و کمترین میزان فرسایش در کاربری‌های مراتع و تالاب اتفاق برآورد شد. بیشتر بودن میزان فرسایش در مراتع منطقه نسبت به کشاورزی و ساخته شده‌ها می‌تواند به این دلیل باشد که مراتع منطقه اغلب مناطق مرتفع و اراضی شیبدار را شامل می‌شوند در حالیکه کشاورزی و ساخته شده‌ها غالباً در بخش‌های هموار و مسطح منطقه توسعه یافتند. بعلاوه، کم تراکم بودن پوشش گیاهی مراتع نیز دلیلی دیگر در این باره محسوب می‌شود. این نتیجه با نتایج مطالعه انجام شده توسط درخشان بابائی و همکاران (Derakhshan Babaei et al., 2021) در حوضه آبخیز کن مطابقت دارد.



شکل ۴- نقشه‌های (الف) فرسایش خاک حاصل از مدل اینوست و (ب) طبقه‌بندی فرسایش خاک در پنج کلاس (خیلی کم: ۰-۰/۵، کم: ۰/۵-۱، متوسط: ۱-۲، زیاد: ۲-۳ و خیلی زیاد: ۳ > تن در هکتار)

Fig.4. Maps of (a) soil erosion resulting from the INVEST model and (b) soil erosion classification into five classes (very low: 0.5-0.5, low: 1-0.5, medium: 1-2, high: 2-3 and very high: >3 tons per hectare)

جدول ۳- میزان مساحت اختصاص یافته به هریک از کلاس‌های فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌ها

Table 3- The amount of area allocated to each of the soil erosion classes and habitat quality

فرسایش خاک Soil erosion				کیفیت زیستگاه‌ها Habitat quality			
طبقه Floor	میزان فرسایش Erosion rate (t ha ⁻¹ y ⁻¹)	مساحت Area		طبقه Floor	ارزش زیستگاهی Habitat value	مساحت Area	
		ha	%			ha	%
خیلی کم Very little	0-0/5	993498	60	خیلی کم Very little	0-0/2	101389	6
کم Low	0/5-1	234465	14	کم Low	0/2-0/4	843041	51
متوسط Medium	1-2	157602	10	متوسط Medium	0/4-0/6	377842	23
شدید Severe	2-3	66567	4	شدید Severe	0/6-0/8	323489	20
خیلی شدید Very intense	3<	193700	12	خیلی شدید Very intense	0/8-1	0	0

در منطقه مطالعاتی بخش‌های غربی دارای بارندگی بیشتری هستند که باعث افزایش میزان فرساینده‌گی باران در این بخش‌ها شده است و با حرکت از سمت غرب به شرق منطقه از میزان آن کاسته می‌شود. میزان فرسایش‌پذیری خاک در کل منطقه به دلیل بیشتر بودن شن و رس نسبت به سیلت خاک، پائین است ($K\text{-factor} < 0.17$). با این وجود، خاک‌های نیمه غربی منطقه از میزان فرسایش‌پذیری بیشتری نسبت به دیگر مناطق آن برخوردار هستند در حالیکه کمترین میزان فرسایش‌پذیری خاک در بخش‌های شرقی مشاهده شد جایی که مناطق مسطح و هموار وجود دارند. بخش‌های غربی منطقه دارای توپوگرافی متنوع و شیب‌های تند هستند در حالیکه نیمه شرقی آن هموار و تقریباً مسطح است که باعث کاهش میزان دامنه و امتداد شیب در بخش‌های شرقی و افزایش آن در مناطق غربی شده است. بیشترین میزان فاکتورهای C و P نیز در بخش‌های غربی و کمترین میزان آن در قسمت‌های شرقی مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهد که روند تغییرپذیری مکانی فاکتورهای R ، LS ، C و P از شرق به غرب منطقه افزایشی است که تقریباً با روند تغییرات فرسایش خاک همسان است و افزایش آنها منجر به افزایش فرسایش خاک در منطقه می‌شود.

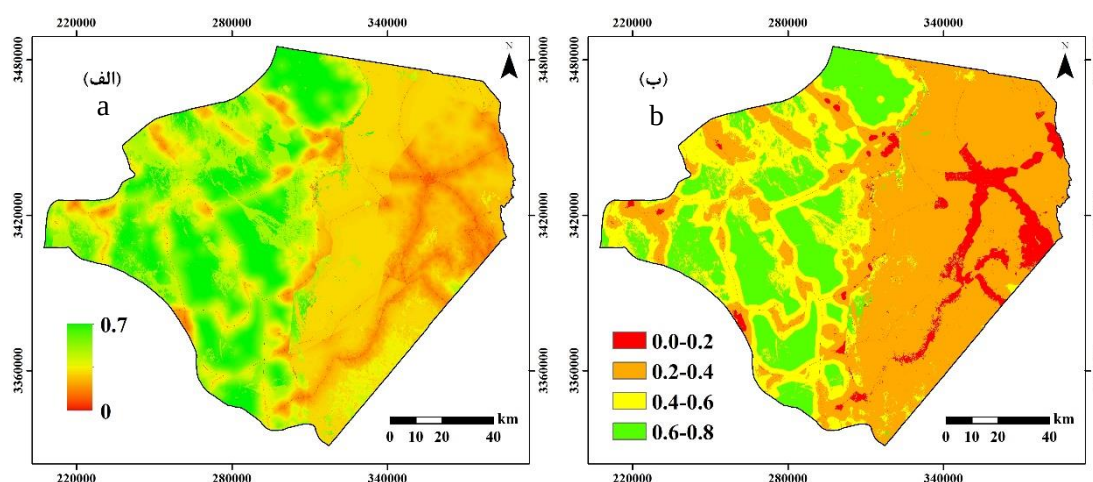
جدول ۴- میزان فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌ها برای هر کاربری

Table 4- Soil erosion rates and habitat quality for each land use

کاربری Usability	مساحت (ha) Area	فرسایش خاک Soil erosion		کیفیت زیستگاه‌ها Habitat quality
		$t\ y^{-1}$	$t\ ha^{-1}\ y^{-1}$	
ساخته شده Made	7110	2671	0/4	0/1
کشاورزی Agriculture	254046	87448	0/3	0/24
شوره‌زار Salt marshes	360984	162210	0/4	0/29
اراضی بایر Barren lands	346387	719288	2/1	0/38
مراعت Meadows	674321	2421009	3/6	0/54
تالاب Wetlands	2984	0	0	0/19

شکل ۵ نتایج ارزیابی کیفیت زیستگاه‌های منطقه بر اساس مدل HQ-InVEST را نشان می‌دهد. معلوم گردید که زیستگاه‌های واقع در شمال و نیمه غربی منطقه از کیفیت بالاتری برخوردار هستند در حالیکه زیستگاه‌های شرقی و جنوب و مناطق نزدیک جاده‌ها و ساخته شده‌ها دارای کمترین مطلوبیت می‌باشند. کیفیت زیستگاه‌های منطقه در پنج کلاس مطلوبیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی گردید که نتایج آن در شکل ۵ و جدول ۳ آورده شده است. نتایج نشان داد که طبقات مذکور به ترتیب ۶، ۵۱، ۲۳، ۲۰ و صفر درصد از سطح منطقه را دربرگرفته‌اند. طبقات مطلوبیت خیلی کم و کم اغلب در مناطق

شرقی مشاهده می‌شوند جاییکه تراکم عناصر انسان ساخت و اراضی کشاورزی وجود دارند در حالیکه طبقات مطلوبیت متوسط و زیاد در نیمه غربی منطقه واقع شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که عناصر انسان ساخت و فعالیت‌های کشاورزی تهدیداتی جدی در راستای کاهش کیفیت زیستگاه‌های منطقه به شمار می‌روند. نتایج مطالعات انجام شده توسط احمدی میرقائد و سوری (Ahmadi Mirghaed & Souri, 2022) و هه و همکاران (He et al., 2017) نیز با نتایج مذکور مطابقت دارد.



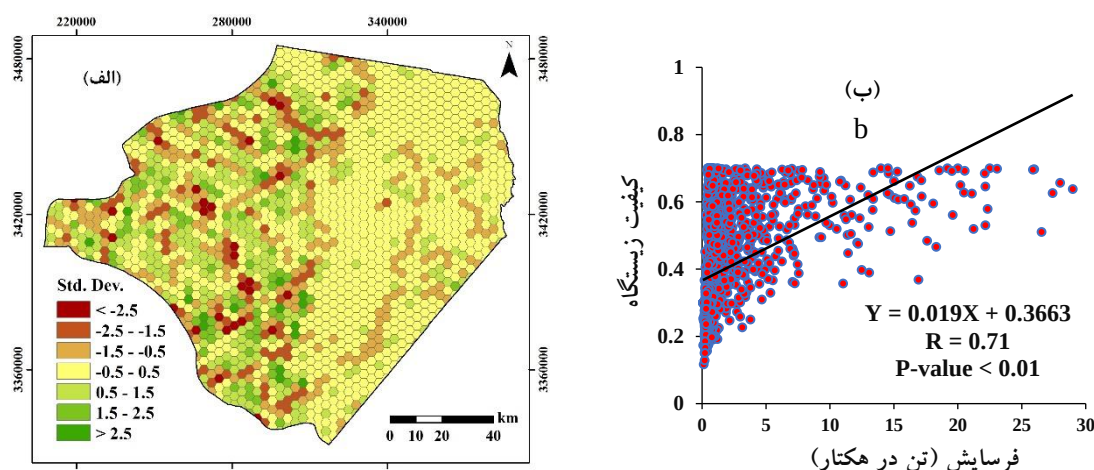
شکل ۵- نقشه‌های (الف) کیفیت زیستگاه‌ها حاصل از مدل اینوست و (ب) طبقه‌بندی کیفیت زیستگاه‌ها در چهار کلاس (خیلی کم: ۰-۰/۲، کم: ۰/۲-۰/۴، متوسط: ۰/۴-۰/۶ و زیاد: ۰/۶-۰/۸)

Fig.5. Maps of (a) habitat quality resulting from the INVEST model and (b) classification of habitat quality into four classes (very low: 0.0-2, low: 0.2-4, moderate: 0.4-6, and high: 0.6-8)

نتایج همچنین نشان داد که ارزش کیفیت زیستگاه‌ها در کاربری‌های ساخته شده، کشاورزی، شوره‌زار، اراضی بایر، مراتع و تالاب بطور میانگین به ترتیب ۰/۱، ۰/۲۴، ۰/۲۹، ۰/۳۸، ۰/۵۴ و ۰/۱۹ برآورد گردید که نشان می‌دهد زیستگاه‌ها در کاربری‌های مختلف منطقه دارای کیفیت کم تا متوسط هستند (جدول ۴). با این وجود، بیشترین و کمترین میزان کیفیت زیستگاه‌ها در کاربری‌های مراتع و ساخته شده‌ها مشاهده گردید. بیشتر بودن کیفیت زیستگاه‌ها در مراتع واقع در غرب منطقه می‌تواند به دلیل فاصله آنها از منابع تهدید و محدودیت دسترسی باشد. موریرا و همکاران (Moreira, Fonseca, Vergílio, Calado & Gil, 2018) نیز تأیید کردند که کیفیت زیستگاه‌های واقع در مناطق مرتفع به دلیل محدودیت دسترسی به آنها بالاتر است.

نتایج تحلیل آماری ارتباط بین کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک در شکل ۶ آورده شده است. آزمون همبستگی اسپیرمن نشان داد که یک رابطه مثبت و معنادار بین کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک در منطقه وجود دارد ($R=0.71$, $P\text{-value}<0.01$). بعلاوه نتایج GWR نیز همبستگی مکانی معنادار بین کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش را تأیید کرد ($R^2=0.91$, $P\text{-value}<0.01$). این نتایج نشان می‌دهد که الگوی مکانی

کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک در منطقه مطالعاتی تقریباً مشابه است بطوریکه زیستگاه‌های با کیفیت بالاتر در بخش غربی منطقه واقع شده اند ضمن آنکه همین بخش‌ها بخاطر ویژگی‌های توپوگرافی، خاک و اقلیمی موجود بطور طبیعی از پتانسیل فرسایش بیشتری برخوردار هستند. این در حالیست که در بخش شرقی منطقه پتانسیل فرسایش و هدررفت خاک کمتر است با وجود آنکه تراکم عناصر انسان‌ساخت و فعالیت‌های کشاورزی در این بخش وجود دارد.



شکل ۶- نتایج تحلیل آماری ارتباط بین کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک (الف) GWR: رگرسیون وزنی مکانی ($R^2=0.91$, $P\text{-value}<0.01$) و (ب) آزمون اسپیرمن

Fig.6. Results of statistical analysis of the relationship between habitat quality and soil erosion (a) GWR: spatial weighted regression ($R^2=0.91$, $P\text{-value}<0.01$) and (b) Spearman test

جمع‌بندی

این مطالعه با هدف ارزیابی ارتباط بین فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌های سیستان با استفاده از مدل اینوست صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که میزان فرسایش سالانه خاک در منطقه ۳/۴۱ تن در هکتار است و پهنه‌های غربی منطقه از پتانسیل بیشتری برای هدررفت خاک برخوردار هستند. بعلاوه، معلوم گردید که بطور کلی زیستگاه‌های منطقه بخاطر شرایط اکولوژیک و انسانی حاکم بر آنها از کیفیت قابل توجهی برخوردار نیستند. با این وجود، زیستگاه‌های بخش شرقی منطقه بخاطر تراکم بیشتر عناصر انسان‌ساخت و فعالیت‌های کشاورزی نسبت به نیمه غربی از کیفیت کمتری برخوردار هستند. نتایج مشخص کرد بخش غربی منطقه با وجود داشتن زیستگاه‌های مطلوب‌تر بخاطر ویژگی‌های اکولوژیکی حاکم بر آن از پتانسیل فرسایش و تلفات خاک بیشتری برخوردار است. نتایج این مطالعه علاوه بر ارائه اطلاعات مفید در مورد کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک، ضرورت توجه بیشتر مدیران و برنامه‌ریزان را برای اتخاذ راهبردهای مناسب به منظور کاهش و کنترل فرسایش بخصوص در زیستگاه‌های با کیفیت مطلوب‌تر در منطقه مشخص می‌سازد.

References

- Ahmadi Mirghaed, F. A., & Souri, B. (2022). Effect of landscape fragmentation on soil quality and ecosystem services in land use and landform types. *Environmental Earth Sciences*, 81(12), 330. <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-732507/v1>
- Ahmadi Mirghaed, F., Rahmani, M., & Molla Aghajanzadeh, S. (2025). Quantification of water yield concerning land use and climate scenarios in the Tajan watershed, North of Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(2), 849-862. <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-024-05749-8>
- Ahmadi Mirghaed, F., Souri, B., Mohammadzadeh, M., Salmanmahiny, A., & Mirkarimi, S. H. (2018). Evaluation of the relationship between soil erosion and landscape metrics across Gorgan Watershed in northern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 1-14. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-018-7040-5>
- Alewel, C., Borrelli, P., Meusburger, K., & Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International soil and Water Conservation Research*, 7(3), 203-225. <http://dx.doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>
- Aneseyee, A. B., Elias, E., Soromessa, T., & Feyisa, G. L. (2020a). Land use/land cover change effect on soil erosion and sediment delivery in the Winike watershed, Omo Gibe Basin, Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 728, 138776. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138776>
- Aneseyee, A. B., Noszczyk, T., Soromessa, T., & Elias, E. (2020b). The InVEST habitat quality model associated with land use/cover changes: A qualitative case study of the Winike Watershed in the Omo-Gibe Basin, Southwest Ethiopia. *Remote Sensing*, 12(7), 1103. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12071103>
- Department of Environment Islamic Republic of Iran. [In Persian] <https://rko.doe.ir/>
- Derakhshan Babaei, F., Nosrati, K., Mirghaed, F. A., & Egli, M. (2021). The interrelation between landform, land-use, erosion and soil quality in the Kan catchment of the Tehran province, central Iran. *Catena*, 204, 105412. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2021.105412>
- Dou, X., Ma, X., Zhao, C., Li, J., Yan, Y., & Zhu, J. (2022). Risk assessment of soil erosion in Central Asia under global warming. *Catena*, 212, 106056. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2022.106056>
- Gomiero, T. (2016). Soil degradation, land scarcity and food security: Reviewing a complex challenge. *Sustainability*, 8(3), 281. <http://dx.doi.org/10.3390/su8030281>
- Gong, J., Xie, Y., Cao, E., Huang, Q., & Li, H. (2019). Integration of InVEST-habitat quality model with landscape pattern indexes to assess mountain plant biodiversity change: A case study of Bailongjiang watershed in Gansu Province. *Journal of Geographical Sciences*, 29, 1193-1210. <http://dx.doi.org/10.1007/s11442-019-1653-7>
- He, J., Huang, J., & Li, C. (2017). The evaluation for the impact of land use change on habitat quality: A joint contribution of cellular automata scenario simulation and habitat quality assessment model. *Ecological Modelling*, 366, 58-67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.10.001>

- Lei, J., Chen, Y., Li, L., Chen, Z., Chen, X., Wu, T., & Li, Y. (2022). Spatiotemporal change of habitat quality in Hainan Island of China based on changes in land use. *Ecological Indicators*, 145, 109707. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109707>
- Li, H., & Shi, D. (2024). Spatio-temporal variation in soil erosion on sloping farmland based on the integrated valuation of ecosystem services and trade-offs model: A case study of Chongqing, southwest China. *Catena*, 236, 107693. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2023.107693>
- Li, N., Zhang, Y., Wang, T., Li, J., Yang, J., & Luo, M. (2022). Have anthropogenic factors mitigated or intensified soil erosion over the past three decades in South China?. *Journal of Environmental Management*, 302, 114093. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114093>
- Mahmoodi, M. A., & Naghshbandi, S. P. (2020). Estimation of Soil Erosion by RUSLE and Remote Sensing Data of Gawshan Dam Basin. *Water and Soil*, 33(6), 845-856. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.v33i6.76446>
- Mirghaied, F. A., & Souri, B. (2023). Contribution of land use, soil properties and topographic features for providing of ecosystem services. *Ecological Engineering*, 189, 106898. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106898>
- Moreira, M., Fonseca, C., Vergílio, M., Calado, H., & Gil, A. (2018). Spatial assessment of habitat conservation status in a Macaronesian island based on the InVEST model: A case study of Pico Island (Azores, Portugal). *Land Use Policy*, 78, 637-649. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.07.015>
- Nematollahi, S., Fakheran, S., Kienast, F., Pourmanafi, S., & Jafari, A. (2021). Assessing the Impact of Road Networks on Decreasing the Quality of Wildlife' Habitats Using the Vicinity Impact Index (Chaharmahal & Bakhtiari Province). *Desert Management*, 8(16), 37-56. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jdmal.2021.243139>
- Nezhadafzali, K., Shahrokhi, M. R., & Bayatani, F. (2019). Assessment soil erosion using RUSLE model and identification the most effective factor in Dekhan watershed basin of southern Kerman. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 8(20), 21-38. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/jneh.2018.21894.1316>
- Obiahu, O. H., & Elias, E. (2020). Effect of land use land cover changes on the rate of soil erosion in the Upper Eyiohia river catchment of Afikpo North Area, Nigeria. *Environmental Challenges*, 1, 100002. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envc.2020.100002>
- Pu, J., Shen, A., Liu, C., & Wen, B. (2024). Impacts of ecological land fragmentation on habitat quality in the Taihu Lake basin in Jiangsu Province, China. *Ecological Indicators*, 158, 111611. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111611>
- Qiao, X., Li, Z., Lin, J., Wang, H., Zheng, S., & Yang, S. (2023). Assessing current and future soil erosion under changing land use based on InVEST and FLUS models in the Yihe River Basin, North China. *International Soil and Water Conservation Research*, 12(2), 298-312. <http://dx.doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.07.001>

- Renard, K. G., & Freimund, J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157(1-4), 287-306. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Proceeding Of ErtS-1 Symposium*, NASA. *Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>
- Sadeghi, S. H., Zabihi, M., Vafakhah, M., & Hazbavi, Z. (2017). Spatiotemporal mapping of rainfall erosivity index for different return periods in Iran. *Natural Hazards*, 87, 35-56. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-017-2752-3>
- Sharp, R., Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Chaplin-Kramer, R., & Olwero, N. (2015). *InVEST Version 3.2. 0 User's Guide*. The Natural Capital Project. The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund. <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest/invest-downloads-data>
- Smith, D. D., & Wischmeier, W. H. (1962). Rainfall erosion. *Advances in Agronomy*, 14, 109-148. [http://dx.doi.org/10.1016/s0065-2113\(08\)60437-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0065-2113(08)60437-x)
- Sun, W., Shao, Q., Liu, J., & Zhai, J. (2014). Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China. *Catena*, 121, 151-163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.05.009>
- Toubal, A. K., Achite, M., Ouillon, S., & Dehni, A. (2018). Soil erodibility mapping using the RUSLE model to prioritize erosion control in the Wadi Sahouat basin, north-west of Algeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(4), 210. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-018-6580-z>
- Van der Knijff, J. M., Jones, R. J. A., & Montanarella, L. (2000). *Soil erosion risk assessment in Europe*. Luxembourg: Official Publications of the European Communities.
- Wei, Q., Abudurehman, M., Halike, A., Yao, K., Yao, L., Tang, H., & Tuheti, B. (2022). Temporal and spatial variation analysis of habitat quality on the PLUS-InVEST model for Ebinur Lake Basin, China. *Ecological Indicators*, 145, 109632. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109632>
- Wu, L., Sun, C., & Fan, F. (2021). Estimating the Characteristic Spatiotemporal Variation in Habitat Quality Using the InVEST Model—A Case Study from Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area. *Remote Sensing*, 13(5), 1008. <http://dx.doi.org/10.3390/rs13051008>
- Zare, M., Panagopoulos, T., & Loures, L. (2017). Simulating the impacts of future land use change on soil erosion in the Kasilian watershed, Iran. *Land Use Policy*, 67, 558–572. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.028>



Identifying Factors Affecting Landslides on Astara Road to Namin Tunnel Using the MLP Model

Fariba Esfandiari Darabad^{a*}, Mehrdad Vahabzadeh^b, Zohreh Sheikhrl^c, Behrouz Nezafat Taklhe^d

^a Professor in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

^b Masters graduate in Geomorphology and Environmental Management, Faculty of Social Sciences University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

^c Master's student in Remote Sensing, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

^d PhD student in Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Article Info	Abstract
Article History Received: 27 March 2024 Received in revised form: 21 April 2024 Accepted: 27 April 2024 Available online: 21 March 2025 Keywords: Landslide susceptibility assessment, MLP neural network, Astara-Namin road, Geospatial factors, Risk zonation, Geomorphic hazards	Landslides are one of the phenomena that cause significant damage, especially in mountainous areas. Therefore, it is essential to evaluate and identify the factors affecting the occurrence of landslides in these areas. The purpose of this research is to identify the factors affecting landslides along the Astara road to Nemin tunnel using an MLP model. The MLP model is one of the efficient neural network models that can solve complex problems. To identify the important factors in the occurrence of landslides, based on field studies, 8 factors have been identified, including: geology, vegetation, distance from the road, land use, slope, aspect, elevation, and recorded landslide locations. After pre-processing, all layers were entered into SPSS MODELER software, and the modeling was designed with 8 input neurons, 6 hidden layer neurons, and 1 output neuron. The results of this research showed that the weighted output of the MLP model assigned the highest weight to the geological layer (0.26), followed by the land use layer and distance from the road (0.14 and 0.13, respectively). For model validation, the AUC value was 0.948 for the training data and 0.962 for the testing data, indicating the model's high reliability in both phases. Therefore, it can be concluded that the geological factor has the greatest impact on the occurrence of landslides in the region compared to other factors. Finally, machine learning models and artificial intelligence are recommended for future studies on landslides and mass movements.

*.Corresponding author : Dr. Fariba Esfandiari Darabad

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

How to cite this article: Esfandiari Darabad, F., Vahabzadeh, M., Sheikhrl, Z., & Nezafat Taklhe, B. (2025). Identifying Factors Affecting Landslides on Astara Road to Namin Tunnel Using the MLP Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), pp.43-60.
<https://doi.org/10.22067/geoe.2024.87409.1475>



©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

Geomorphic phenomena are natural occurrences that manifest with specific spatial and temporal characteristics. According to the Geological Society, a landslide is defined as the downward movement of mass materials on sloping surfaces. Landslides cause significant damage worldwide each year and are recognized as one of the most critical geomorphological hazards. Natural factors such as earthquakes, rainfall, and snowmelt, along with human activities such as road construction, infrastructure development, and mining, exacerbate landslide occurrences, particularly in mountainous regions. One key strategy to mitigate damages caused by mass movements, particularly landslides, is the accurate and timely identification of areas with instability potential. Determining the factors influencing landslides and categorizing associated risks are crucial for developing effective mitigation strategies. The Astara–Namin tunnel road, a major route connecting Gilan and Ardabil provinces, is highly susceptible to landslides due to its unique geomorphic and geological conditions, its location in a mountainous region, and its specific climatic characteristics. Given the importance of this road and the associated slope hazards, especially landslides, conducting geomorphological studies to identify influencing factors is imperative. These studies can lead to effective planning and measures to reduce risks, prevent human and financial losses, and protect the local environment. This research aims to identify the factors affecting landslides along the Astara–Namin tunnel road using the Multilayer Perceptron (MLP) model.

Material and Methods

This study utilized various geospatial datasets, including a 1:100,000-scale geological map of Astara County for geological formations, a 1:50,000-scale topographic map for road layers, and a 12.5-meter resolution DEM from ALOS-PALSAR. Sentinel-2 satellite imagery was employed for land use and vegetation cover analysis, while GPS data was used to map landslide-prone areas. The Multilayer Perceptron (MLP) model is a type of artificial neural network inspired by the structure and functionality of the human brain. The MLP model is highly effective in solving complex problems by recognizing patterns and relationships in data.

Results and Discussion

The results indicate that the geological layer holds the highest weight (0.26), followed by land use (0.14) and distance from the road (0.13), suggesting that landslide occurrences along the Astara–Namin tunnel road are primarily influenced by these factors. The study classifies landslide-prone areas into four risk levels—low, medium, high, and very high—based on the Jenks natural breaks classification method. The area distribution for each risk class in the MLP model is as follows: very high-risk zones (23.14 km²), high-risk zones (47.2 km²), medium-risk zones (21.19 km²), and low-risk zones (0.9 km²). These findings demonstrate the model's capability in identifying critical landslide-prone areas along the studied route.

Conclusion

The presence of andesite and sedimentary rock layers, such as limestone and other fragile formations, contributes to slope instability under external dynamic forces. Excessive water intake from rainfall and snowmelt saturates the surface layers of slopes, transforming the soil into a semi-fluid state. Since the lower layers are more resistant, the upper layers tend to move downslope, leading to landslides. Additionally, human activities significantly influence landslide occurrences in the region. Extensive land use changes, particularly those that disturb natural vegetation and soil stability, exacerbate landslide risks. The MLP algorithm evaluation demonstrated high reliability in both training and testing phases, making it a valuable tool for identifying landslide-influencing factors. The distinguishing feature of this algorithm is its design, which mimics the human brain's neural networks, enabling it to solve complex problems effectively. This study highlights the necessity of incorporating advanced computational models such as MLP in geomorphological hazard assessments to enhance predictive accuracy and risk mitigation strategies.



شناسایی عوامل مؤثر بر زمین لغزش در جاده آستارا تا تونل نمین با استفاده از مدل MLP

فریبا اسفندیاری در آباد^{۱*}، مهرداد وهاب زاده^۲، زهره شیخلر^۳، بهروز نضافت تکه^۴

^۱استاد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۲کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی و آمایش محیط، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۳دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
^۴دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸ کلمات کلیدی: ارزیابی آسیب پذیری زمین لغزش، شبکه عصبی MLP، جاده تونلی آستارا-نمین، عوامل ژئوماتیک، پهنه بندی خطر، مخاطرات ژئومورفیک	زمین لغزش یکی از پدیده هایی است که رخداد آن سبب ایجاد خسارات زیادی به ویژه در مناطق کوهستانی می شود. بنابراین ارزیابی و شناخت عوامل مؤثر بر وقوع رخداد زمین لغزش در مناطق کوهستانی امری ضروری است. هدف از این پژوهش شناسایی عوامل مؤثر بر زمین لغزش در جاده آستارا تا تونل نمین با استفاده از مدل MLP می باشد. مدل MLP یکی از مدل های کارآمد شبکه عصبی است که توانایی حل مسائل پیچیده را دارد. برای شناسایی عوامل مهم در رخداد زمین لغزش با توجه به مطالعات میدانی ۸ عامل شناسایی شده است که شامل: زمین شناسی، پوشش گیاهی، فاصله از جاده، کاربری راضی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، نقاط واقعی زمین لغزش استفاده شده است. بعد از پیش پردازش ها تمام لایه ها وارد نرم افزار SPSS MODELER شده و مدل سازی با ۸ نورون ورودی ۶ نورون میانه و ۱ خروجی طراحی شده است. نتایج این پژوهش نشان داده که خروجی وزنی مدل MLP بیشترین ارزش وزنی را برای لایه زمین شناسی با مقدار ۰/۲۶ برای کاربری راضی و فاصله از جاده به ترتیب مقدار ۰/۱۴ و ۰/۱۳ اختصاص داده است. هم چنین در بخش اعتبار سنجی مدل مقدار AUC عدد ۰/۹۴۸ در بخش آموزش و ۰/۹۶۲ در بخش تست شبکه را نمایش می دهد که گویای این است که مدل هم در بخش آموزش و هم در بخش تست دارای اعتبار بالایی می باشد بنابراین نتیجه گیری می شود که عامل زمین شناسی نسبت به سایر عوامل در رخداد زمین لغزش در منطقه تأثیر زیادی دارد و در نهایت پیشنهاد می گردد در مطالعات آتی برای مطالعه و ارزیابی زمین لغزش و حرکات دامنه ای از مدل های یادگیری ماشینی و هوش مصنوعی استفاده شود.

مقدمه

مخاطرات ژئومورفولوژیک، پدیده‌های هستند که ممکن است با ابعاد و دوره‌های زمانی خاصی در یک منطقه خاص رخ دهند. طبق تعریف انجمن زمین‌شناسی، زمین‌لغزش به معنای حرکت توده‌های مواد به سمت پایین روی سطوح شیب‌دار است (Nasiri, 2008). هر ساله، رخداد زمین‌لغزش خسارات هنگفتی را در سرتاسر جهان به بار می‌آورد و به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی شناخته می‌شوند. عوامل طبیعی مانند زلزله، بارندگی و ذوب برف، در کنار فعالیت‌های انسانی مثل ساخت جاده و سازه‌ها، فعالیت معدن‌کاری می‌توانند به‌عنوان عامل تشدیدکننده رخداد زمین‌لغزش در مناطق مختلف به‌ویژه در نواحی کوهستانی باشد (Cubito, Ferrara & Pappalardo, 2005). یکی از راهکارهای کلیدی برای کاهش خسارات ناشی از حرکات دامنه‌ای به‌ویژه زمین‌لغزش، شناسایی دقیق و به‌موقع مناطق خطرناک و مستعد است (Mokhtari, 1993). یافتن عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش و تقسیم‌بندی خطرات ناشی از آن، برای دستیابی به راهکارهای کنترل این پدیده و کاهش خسارات احتمالی امری ضروری است. جاده ارتباطی آستارا به تونل نمین به‌عنوان جاده پرتردد بین استان‌های گیلان و استان اردبیل به‌ویژه شهرستان نمین شناخته می‌شود و در حال حاضر به خاطر شرایط ژئومورفیک و زمین‌شناسی خاص و هم‌چنین به علت قرارگیری در منطقه کوهستانی و اقلیم ویژه تحت تأثیر فرآیند دامنه‌ای از نوع زمین‌لغزش قرار دارد. با توجه به اهمیت جاده آستارا تا تونل نمین و خطرات ناشی از مخاطرات دامنه‌ای به‌ویژه رخداد زمین‌لغزش در این مسیر، انجام مطالعات ژئومورفولوژیک و شناخت عوامل مؤثر بر آن به‌عنوان یک ضرورت انکارناپذیر مطرح می‌شود. این مطالعات می‌تواند به برنامه‌ریزی و اقداماتی مؤثر برای کاهش خطرات و خسارات جانی و مالی و حفاظت از محیط‌زیست منطقه منجر شود. در رابطه با پدیده زمین‌لغزش و خطرات ناشی از آن مطالعات زیادی در ایران و خارج از آن صورت گرفته است: محمدی و ساسانی‌پور (Mohammadi & Sasanpour, 2021) به تحلیل ریسک وقوع زمین‌لغزش و واریزه در جاده‌های هراز و لواسانات پرداخته‌اند، در این تحقیق از تحلیل مکانی در محیط ArcGIS استفاده شده است و محققین به این نتیجه رسیدند که در تحلیل خطر وقوع زمین‌لغزش مناطقی که جهت شمال شرقی و جنوب غربی دارند و هم‌چنین خروجی نقشه نشان‌دهنده‌ی این است که بیش‌ترین مناطقی که خطر ریزش سنگ دارند مربوط به شیب بالای ۵۰ درصد است. رضایی مقدم و همکاران (Rezaei Moghaddam, Mokhtari & Samandar, 2021) به مدل‌سازی حرکات توده‌ای و مدیریت مناطق حساس به وقوع این حرکات با استفاده از الگوریتم‌های آماری و شبکه عصبی (مطالعه موردی: حوضه آبریز اوجان چای) پرداختند. محققین به این نتایج رسیدند که در مدل سیستم شبکه عصبی ۱۰/۳۲ درصد و در مدل رگرسیون لجستیک ۵/۰۶ درصد در پهنه‌ی خطر زیاد قرار گرفته که مربوط به مناطقی است که به لحاظ لیتولوژی مقاومت کمی دارند. انتظاری و کردوانی (Entezari & Kordavani, 2022) به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های مبتنی بر GIS و داده‌های راداری (مطالعه موردی: فریدون‌شهر) پرداختند. محققین در این تحقیق به این نتایج رسیدند که نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش ۶۷ درصد از سلول نقشه با رتبه‌ی خیلی زیاد و زیاد با سلول نقشه جابه‌جایی سطحی تصاویر راداری هم‌خوانی دارد. اصغری سراسکانرود و پیروزی (Asghari Saraskanroud & Pirizi, 2023) به

ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره WLC، OWA، VIKOR و MABAC در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش (مطالعه موردی: حوضه گیوی چای استان اردبیل) پرداختند و نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده این است که هر یک از مدل‌ها با مقدار ۱۵/۴۱ درصد برای مدل VIKOR، ۶۶/۰۷ درصد برای مدل OWA، ۵۵/۲۳ درصد برای مدل WLC، ۵۶/۳۱ درصد برای مدل MABAC با شاخص پرخاطر برای مساحت منطقه مورد مطالعه به‌دست آمده است و ارزیابی مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل VIKOR نسبت به سایر مدل‌ها کارایی بیشتری دارد. میرزائی و همکاران (Mirzai, Momeni & Abdi, 2024) به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در امتداد آزادراه خرم آباد-زال در استان لرستان با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP¹) پرداختند. نتایج نشان داد که ۵۴ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل زمین لغزش زیاد و خیلی زیادی می‌باشد. قاطع و همکاران (Ghateh, Malekzadeh & Pourghasemi, 2024) به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز بالهارود شهرستان گرمی) پرداختند. نتایج نشان داد که تصاویر راداری از پتانسیل خوبی برای آشکارسازی ناپایداری دامنه‌ها و محاسبه جابه‌جایی آن‌ها برخوردار می‌باشد. هونگ و همکاران (Hong et al., 2017) به روش‌های ارزیابی خطر زمین لغزش در امتداد مناطق گسلی بر اساس نحوی کار چندگانه (مطالعه موردی از منطقه گسل لیکسیان-لوجیابو در استان گانسوچین) پرداختند. در این تحقیق از سه مدل مختلف مثل مدل بهبودیافته نیومارک، مدل تئوری فراکتال، مدل رگرسیون استفاده شده است و نتایج نشان داد که مدل بهبودیافته نیومارک عملکرد خوبی نسبت به سایر مدل‌ها داشته است. راجا و همکاران (Raja, Çiçek, Türkoğlu, Aydin & Kawasaki, 2017) به نقشه‌برداری حساسیت زمین لغزش حوضه رودخانه سرا با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک در حوضه رودخانه سرا واقع در ترکیه پرداختند. محققین به این نتیجه رسیدند که ۳۸/۸ درصد از مساحت منطقه مورد نظر در مناطقی با حساسیت زیاد و متوسط به زمین لغزش را تشکیل می‌دهند و گسترش آن بیشتر در قسمت جنوب حوضه رودخانه سرا و در امتداد نهرها قرار دارد. ژائو و همکاران (Zhao, Tian, Li & Ma, 2018) به پهنه‌بندی خطر و بلایای ناشی از شیب در بزرگراه تنه: مطالعه موردی در شمال شانسی چین پرداختند در این تحقیق از مدل ارزیابی و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شده است و نویسندگان به این نتایج دست یافتند که پهنه‌بندی خطر بلایای ناشی از شیب بزرگراه در شمال شانسی با توزیع واقعی مطابقت دارد. آبیجا و همکاران (Abija, Nwosu, Ifedotun & Osadebe, 2019) به ارزیابی حساسیت زمین لغزش کالابار، نیجریه با استفاده از ژئوتکنیک، سنجش از دور و تصمیم‌گیری چند معیاره و تحلیل پیامدهای برنامه‌ریزی و توسعه شهری پرداختند. محققین به این نتیجه رسیدند که احتمال رخداد زمین لغزش در شیب زمین ۳۲ درصد بیشتر رخ می‌دهد در حالی که جهت شیب، نوع خاک و انسجام آن، زاویه اصطکاک، هدایت هیدرولیکی، زهکشی، کاربری اراضی و شاخص پوشش گیاهی نرمال شده عامل ایجادکننده است. میر و همکاران (Mir, Habib, Kumar & Bhat, 2024) به نقشه‌برداری حساسیت زمین لغزش و ارزیابی خطر با استفاده از کل ارزش‌های حساسیت برآورد شده در امتداد NH44 در جامو و کشمیر، هیمالیا غربی پرداختند. نتایج نشان داد که از تصاویر رصد زمین با وضوح بالا و سایر مجموعه داده‌ها

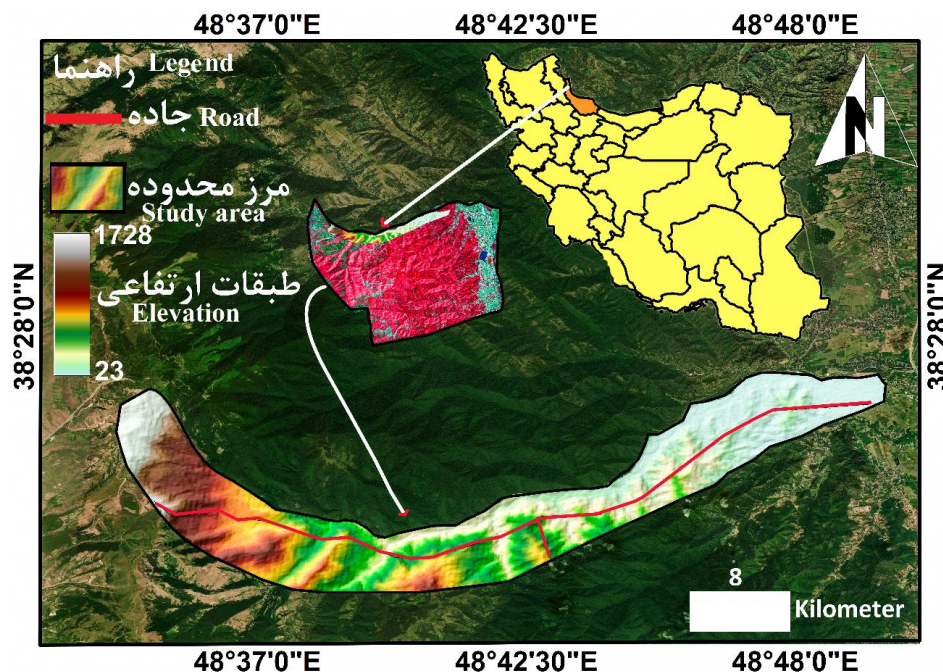
برای تولید نقشه‌های عامل جغرافیایی قادر است سطوح مختلف زمین‌لغزش را شناسایی کند. لیو و همکاران (Liu, Shao & Shao, 2024) به پهنه‌بندی حساسیت لغزشی با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در منطقه بزرگ شیان، چین پرداختند. نتایج نشان داد که مناطق حساس به زمین‌لغزش متوسط تا بسیار زیاد قادر به مهار ۸۲/۵۸ درصد از زمین‌لغزش‌های تاریخی هستند. آکدهی و همکاران (Alqadhi, Mallick, Hang, Al Asmari & Kumari, 2024)، به ارزیابی تأثیر ساخت‌وساز جاده بر حساسیت زمین‌لغزش در زمین کوهستانی عربستان سعودی: یک رویکرد یادگیری عمیق بهینه‌بیزی با مکانیسم توجه و تجزیه و تحلیل حساسیت پرداختند. نتایج نشان داد که شبکه‌های جاده‌ای به‌طور قابل‌توجهی بر مناطق شناسایی‌شده به‌عنوان مناطق پرخطر تأثیر می‌گذارد، که در این راستا هدف از پژوهش حاضر شناسایی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش در جاده آستارا تا تونل نمین با استفاده از مدل MLP^1 می‌باشد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

جاده ارتباطی آستارا به تونل نمین با طول ۴۲ کیلومتر در مختصات جغرافیایی 48° درجه $37'$ دقیقه و 0° ثانیه تا 48° درجه $43'$ دقیقه و 0° ثانیه طول شرقی و 38° درجه $20'$ دقیقه 0° ثانیه عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). این محور استان گیلان را به استان اردبیل وصل می‌کند و به‌عنوان یکی از مسیرهای کوهستانی برجسته در ایران شناخته می‌شود. این جاده ارتباطی به دلیل شرایط ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی ویژه به یکی از جاده‌های خطرناک و معروف کشور به لحاظ رخداد حرکات دامنه‌ای تبدیل شده است. در امتداد این جاده، ساختارهای زمین‌شناسی مختلفی قابل مشاهده است. از تونل نمین تا روستای حیران، سنگ‌های آندزیت همراه با لایه‌های کنگلومرا دیده می‌شود، از روستای حیران تا نزدیکی شهر آستارا، سنگ‌های رسوبی شامل سنگ‌آهک، لایه‌های کنگلومرا و تراورتن مشاهده می‌شوند. به دلیل تأثیرات اقلیمی دریای خزر، منطقه اطراف شهر آستارا اقلیم مرطوب خزری دارد. کاربری اصلی این منطقه، کشاورزی و مرتع است و بارش متوسط سالیانه حدود ۸۴۰ میلی‌متر است.

1 Multi Layer Perceptron



شکل ۱- نقشه محدوده مورد مطالعه

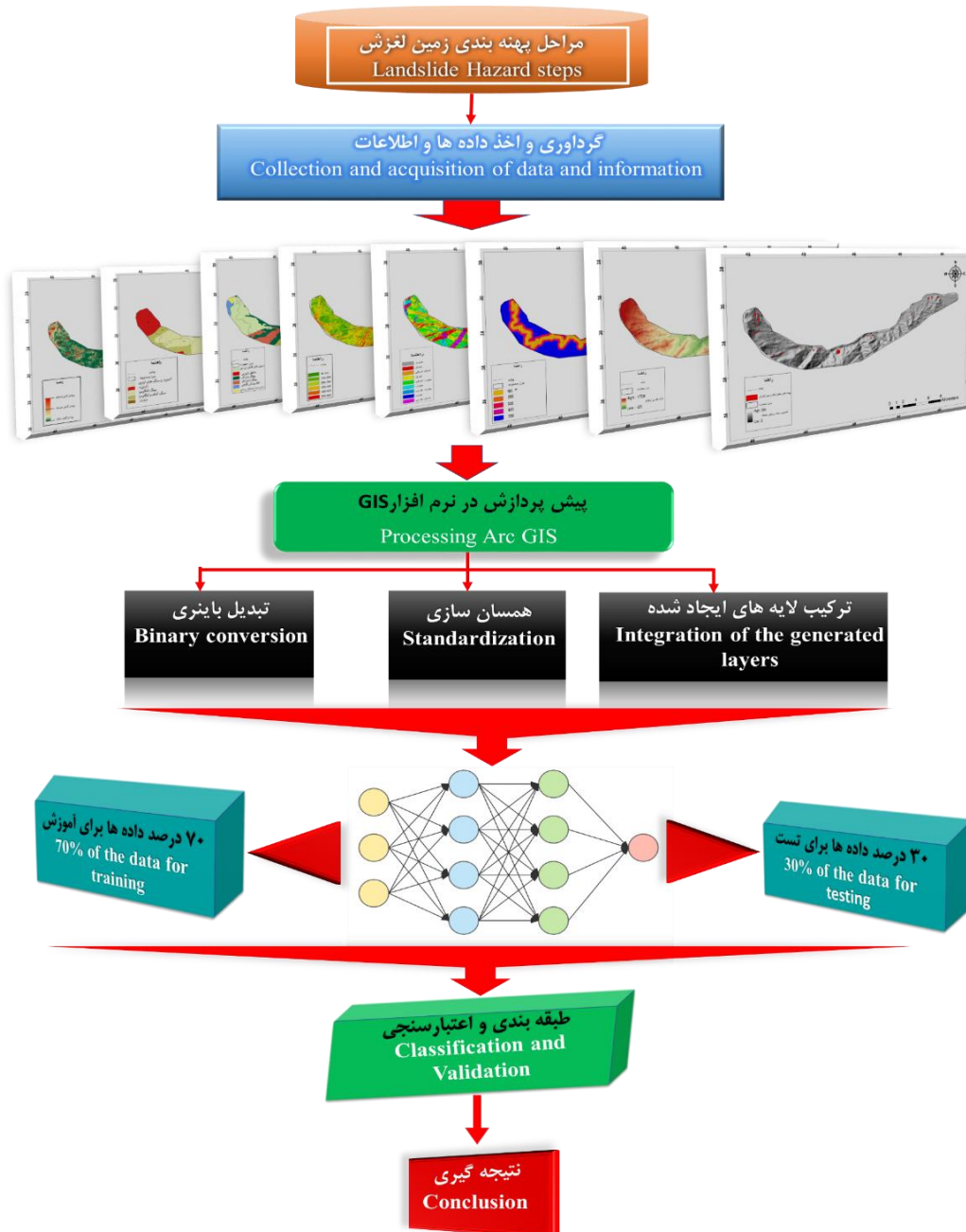
Fig.1. Location of the study area

روش پژوهش

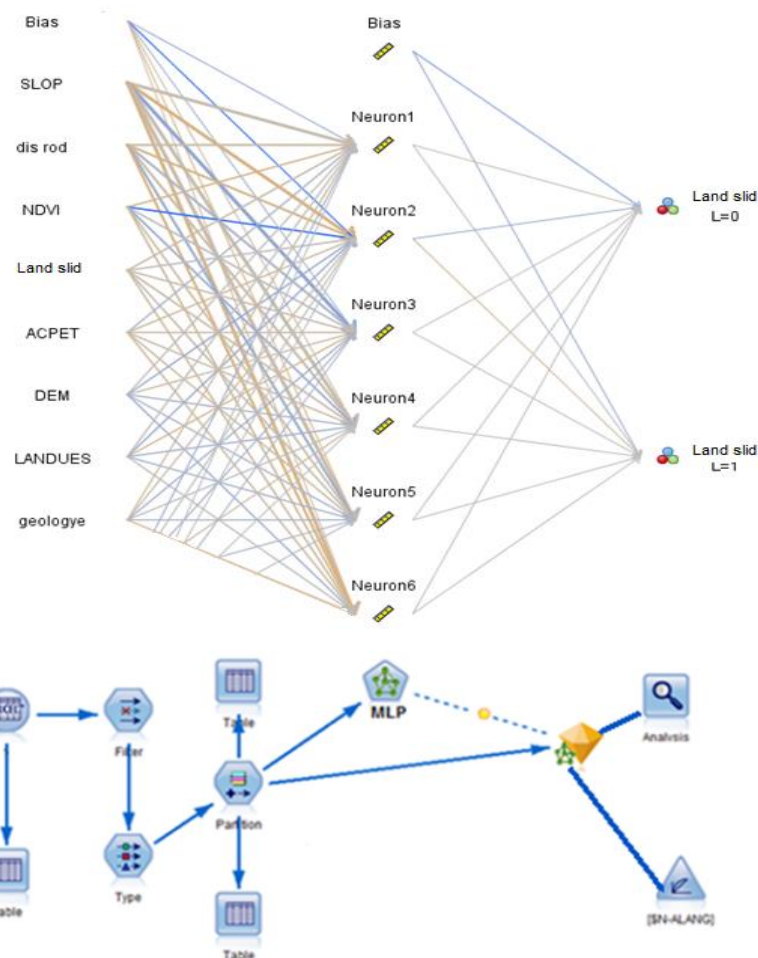
در پروسه انجام این پژوهش از داده و اطلاعات مختلفی استفاده شده است که شامل: نقشه زمین شناسی شهرستان آستارا با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ که نقشه مربوط به سازندهای زمین شناسی از این نقشه اخذ شده است، نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ که لایه های مربوط به جاده از این نقشه برداشت شده است، از مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ مربوط به ماهواره ALOS - PALSAR و همچنین از تصاویر ماهواره ای سنتینل ۲ برای کاربری اراضی و پوشش گیاهی استفاده شده است. همچنین برای برداشت مناطق خطرناک به لحاظ زمین لغزش از دستگاه GPS استفاده شده است. تمام داده های مورد استفاده برای آماده سازی در مرحله اول وارد نرم افزار Arc GIS شده و پردازش مقدماتی روی تمام لایه ها انجام شده است (شکل ۲).

با توجه به مطالعات میدانی و بررسی تصاویر ماهواره ای برای شناسایی عوامل مؤثر بر زمین لغزش در جاده آستارا تا تونل نمین، ۸ لایه به ترتیب: ۱- زمین شناسی ۲- پوشش گیاهی ۳- شیب ۴- کاربری اراضی ۵- فاصله از جاده ۶- جهت شیب ۷- نقاط واقعی زمین لغزش ۸- ارتفاع، با استاندارد فرمت رستری مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۴ تا ۱۱). لایه نقاط واقعی زمین لغزش در این فرایند به عنوان لایه کمکی در جهت آموزش مدل به کار گرفته شده است. تمام لایه ها بعد از تولید به صورت مشترک باهم جمع شده و یک تصویر رستری واحد ایجاد شده است. تصویر رستری واحد شامل تمام مقادیر عددی ۸ لایه های بالا می باشد. سپس برای فهم مدل از ورودی داده ها، تمام مقادیر پیکسل ها به صورت استاندارد طبقه بندی شده است. این طبقه بندی کمک می کند تا مدل در پردازش دچار خطا نشود چراکه ورودی مدل دارای مقادیر زیادی عدد است و این طبقه بندی باعث

انسجام بین مقادیر می‌شود (Esfandiary Darabad, Rahimi, Navidfar & Arsalan, 2020). بعد از اتمام فرایند طبقه‌بندی، مدل‌سازی در نرم‌افزار SPSS Modeler با ۸ نورون ورودی با ۶ نورون میانه و ۱ خروجی انجام شد و ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد داده‌ها برای تست مدل داده اختصاص داده شدند. نوع الگوریتم مدل MLP از نوع پس از انتشار خطا می‌باشد. این الگوریتم در عین سادگی بسیار کارآمد بوده و باعث یادگیری هرچه بهتر مدل می‌شود و اتمام فرایند مدل زمانی است که به کم‌ترین میزان خطا رسیده باشد (شکل ۳).

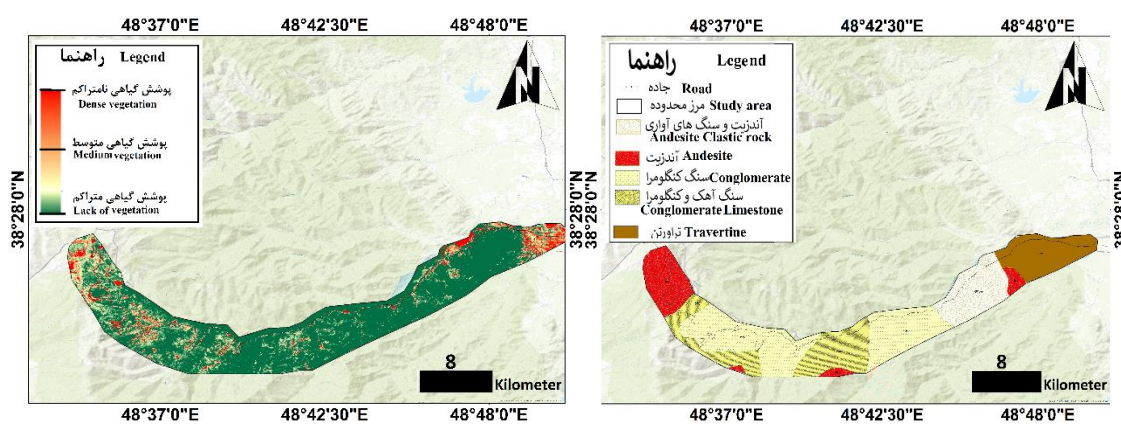


شکل ۲- نمودار جریان تحقیق
Fig.2. Flowchart of the Research



شکل ۳- مدل طراحی شده MLP

Fig.3. Designed MLP model

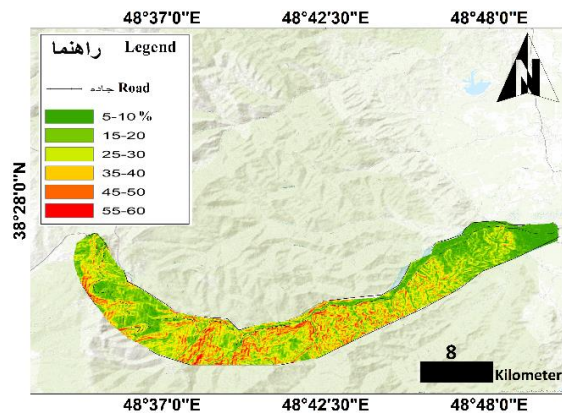


شکل ۵- نقشه پوشش گیاهی

Fig.5. Vegetation map

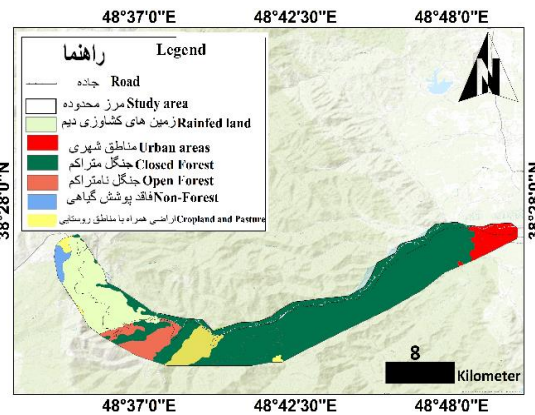
شکل ۴- نقشه زمین شناسی

Fig.4. Geology Map



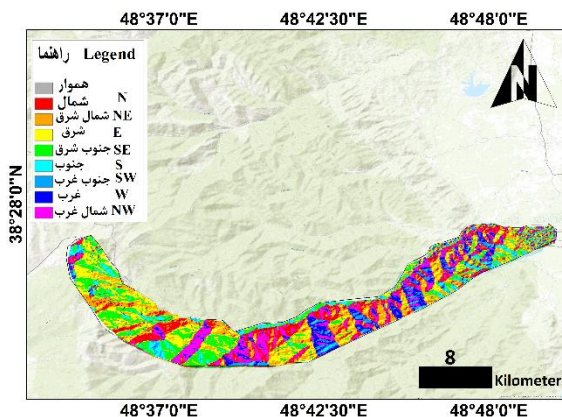
شکل ۷- نقشه شیب

Fig.7. Slope Map



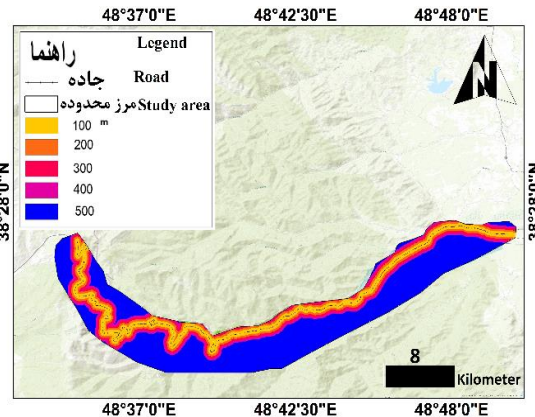
شکل ۶- نقشه کاربری اراضی

Fig.6. landuse Map



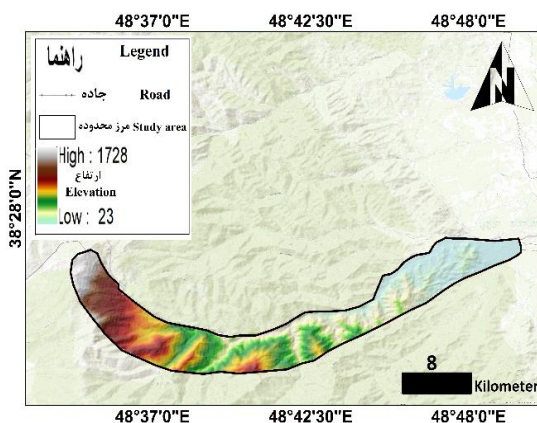
شکل ۹- نقشه جهت شیب

Fig.9. slope Aspect Map



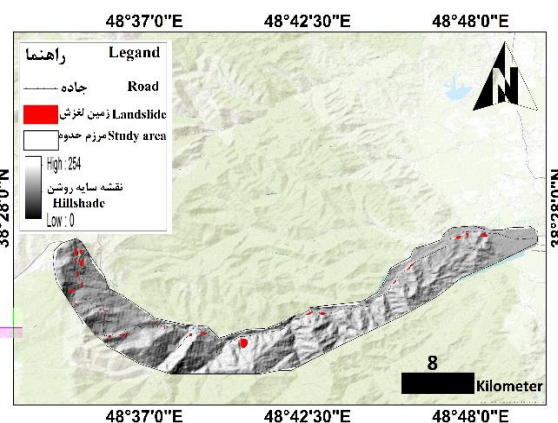
شکل ۸- نقشه فاصله از جاده

Fig.8. Distance from Road map



شکل ۱۱- نقشه ارتفاع

Fig.11. Elevation



شکل ۱۰- نقشه نقاط زمین لغزش

Fig.10. Landslide Points Map

مدل MLP

مدل MLP یا پرسپترون چندلایه، نوعی شبکه عصبی مصنوعی است که از ساختار مغز انسان الهام گرفته شده است. مدل MLP توانایی بالایی در حل مسائل پیچیده دارد و به طور معادل، این مدل تلاش می کند تا الگوها و ارتباطات موجود در داده ها را به خوبی مدل کند (Ranjithan, Eheart & Garrett, 1995). مدل MLP از سه لایه شامل: ۱- نورون ورودی ۲- نورون میانه ۳- نورون خروجی تشکیل شده است که هر لایه وظایف خاص خود را بر عهده دارد و تعداد نورون ها و توابع فعال سازی هر لایه با استفاده از آزمون و خطا و باهدف دستیابی به بهترین عملکرد، مشخص می شود (Demuth & Beale, 1992). برای حل مسائل با نوع غیرخطی، نورون های پنهان به شبکه وصل می شوند که این کار قدرت مدل را در شناسایی الگوها و روابط توابع افزایش می دهد. تعیین تعداد و نورون های هر لایه با توجه به مقایسه دقت مدل نهایی برای ساختارهای مختلف انجام می شود و ساختار بهینه انتخاب می شود. برای آموزش این شبکه، از الگوریتم پس انتشار خطا استفاده می شود که با مقایسه خروجی های واقعی با خروجی های مورد انتظار، وزن ها را تنظیم می کند. بر اساس قضیه کولموگوروف، یک شبکه پرسپترون سه لایه قادر است تا هر نوع فضایی را تفکیک کند (Jouybari Moghaddam & Rostami, 2018).

نتایج و بحث

شبکه عصبی جهت طراحی نیازمند سه دسته داده آموزشی، آزمایشی و صحت سنجی است، داده های آموزشی به منظور پیدا کردن رابطه بین ورودی ها و خروجی های مشاهده شده توسط مدل استفاده می شود. با توجه به (جدول ۱) نتایج نشان دهنده این است که مدل MLP بیشترین ارزش وزنی برای لایه زمین شناسی با مقدار ۰/۲۶ و برای لایه کاربری اراضی و فاصله از جاده به ترتیب مقدار ۰/۱۴ و ۰/۱۳ بوده که نشان دهنده این است که رخداد زمین لغزش در جاده آستارا تا تونل نمین و خطرات ناشی از آن بیشتر وابسته به این متغیرها است.

جدول ۱- مقادیر وزنی خروجی مدل MLP

Table 1- Weighted values of the model MLP output

نورون ورودی Input Neuron	وزن نورون خروجی Output Neuron Weight
NDVI	0.11
ASPECT	0.09
LANDUES	0.14
Geology	0.26
DEM	0.11
Dis road	0.13
SLOPE	0.16

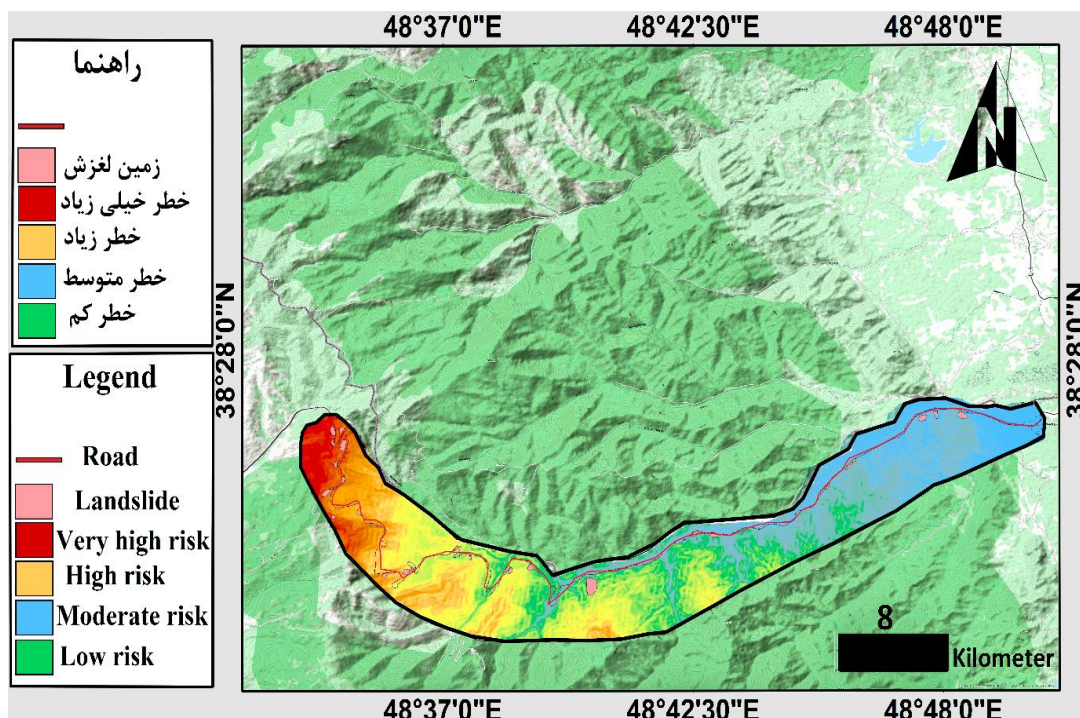
بر اساس (شکل ۱۲) و مساحت مناطق خطرناک در چهار رتبه به صورت: کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به روش جنکس طبقه بندی شده است. الگوریتم جنکس به عنوان یک روش مؤثر برای ترتیب دهی مقادیر در کلاس های مختلف ارائه شده است، این الگوریتم از یک روند تکراری برای گروه بندی داده ها استفاده می کند تا

میانگین انحراف هر طبقه از میانگین کل را به حداقل برساند و به همراه آن، واریانس بین طبقه‌ها را به حداکثر افزایش دهد (Jahandar, Aghagolzadeh & Kazemi Tabar, 2018). طبق جدول ۲ نیز مساحت طبقات خطرپذیری نشان‌دهنده این است که در الگوریتم پرسپترون چندلایه بیشترین طبقه به لحاظ خطرپذیری دارای مقدار ۲۳/۱۴ کیلومترمربع، برای طبقه خطرپذیری زیاد مقدار ۴۷/۲ کیلومترمربع، در بخش خطرپذیری متوسط نیز نتایج مقادیر مساحت نشان‌دهنده این است که الگوریتم پرسپترون چندلایه با مساحت ۲۱/۱۹ کیلومترمربع، در طبقه خطرپذیری کم با مساحت ۰/۹ کیلومترمربع است.

جدول ۲- مساحت طبقات خطرناک

Table 2- Area of Hazard Classes

مساحت به km^2	طبقات ارزیابی خطر با زمین لغزش با مدل MLP
Area km^2	Landslide Hazard Assessment Classes Using the MLP Model
0.9	خطرپذیری کم (Low risk class)
21.19	خطرپذیری متوسط (Moderate risk class)
47.07	خطرپذیری زیاد (High risk class)
23.14	خطرپذیری خیلی زیاد (Very high risk class)



شکل ۱۲- نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در جاده آستارا به تونل نمین

Fig.12. Landslide Hazard Zoning Map of the Astara-Namin Tunnel Road



شکل ۱۳- رخداد زمین لغزش در نزدیکی شهر آستارا. شکل ۱۴-دامنه مستعد رخداد لغزش در گردنه حیران
 Fig.14. Landslide-Prone Slopes in Heyran Pass Fig.13. Landslide Occurrence, Astara City.



شکل ۱۵- رخداد زمین لغزش در شالیزارهای اطراف شهر آستارا
 Fig.15. Landslide Occurrence in the Rice Fields Surrounding Astara City

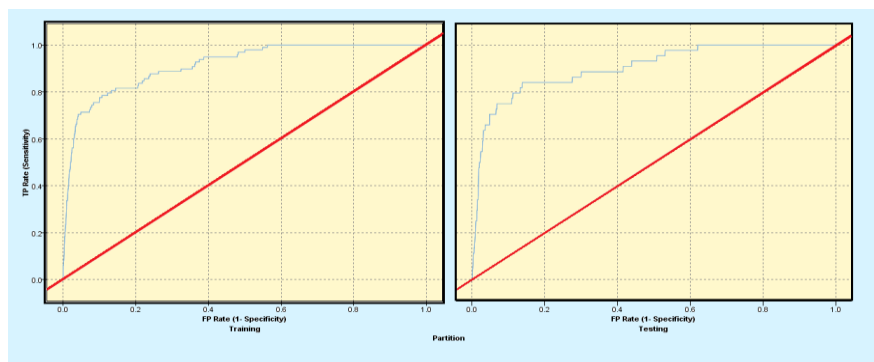


شکل ۱۶- رخداد زمین لغزش در ۱۰ کیلومتری تونل نمین. شکل ۱۷- رخداد زمین لغزش ۱۹ کیلومتری جاده آستارا به تونل نمین

Fig.16. Landslide Occurrence 10 km from Namin Tunnel. Fig.17. Landslide Occurrence 19 km along the Astara-Namin Tunnel Road

اعتبار سنجی خروجی مدل MLP

برای اعتبار سنجی داده‌ها و نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش از منحنی ROC در رابطه با خروجی داده‌ها استفاده شده است. این منحنی یادشده هم برای داده‌های آموزشی اجرا شده هم برای داده‌های تست شبکه، برای اعتبار سنجی یک مدل در وهله اول باید مرحله آموزش و اعتبار سنجی شود تا میزان ارزش بخش آموزشی معلوم شود. مدلی که در بخش آموزش دارای اعتبار پایینی باشد عموماً در مرحله نهایی نیز داده‌ها دارای دقت کم‌تری خواهد بود. هم‌چنین اعتبار سنجی بخش تست شبکه نیز به‌عنوان بخش نهایی در اعتبار سنجی شناخته می‌شود، برحسب نوع و میزان آموزش کیفیت داده‌های خروجی نیز متغیر است. هم‌چنین در بخش تست شبکه نمی‌توان از مقادیر سلولی مناطق خطر ریزش استفاده کرد بنابراین در بخش طراحی مدل داده‌ها به ۷۰ درصد آموزش و ۳۰ درصد تست شبکه تقسیم شده است. به مثال ساده نرم‌افزار در مرحله مدل‌سازی ۳۰ درصد مقادیر سلولی مناطق ریزشی را به‌صورت تصادفی نگهداشت است و آن را با داده‌های آموزشی ترکیب نمی‌کند و در آخر برای تست شبکه از همین داده‌های ۳۰ درصد استفاده می‌شود، نرم‌افزار به‌صورت خودکار با عمل مقایسه داده‌های خروجی و داده‌های ۳۰ درصد از طریق نمودار اعتبارسنجی نتیجه خروجی را نمایش می‌دهد. با توجه به منحنی (شکل ۱۸) در بخش اول مربوط به قسمت آموزش مدل MLP است، میزان اعتبار نشان‌دهنده این است که مدل به‌خوبی آموزش‌دیده و توانسته بخش زیادی از مناطق خطرناک به‌لحاظ زمین لغزش شناسایی کند. معیار این منحنی به گونه است که خطوط رسم شده هرچه دارای فاصله بیشتری از منحنی قرمز اصلی باشد دارای اعتبار بالایی است هم‌چنین در نمودار بالا منحنی آبی به سمت چپ مایل شده و به سمت بالا روانه شده که این حالت هم نمایانگر اعتبار بالای مدل در بخش آموزش است. بنابراین آموزش صحیح مدل سبب شده که نتایج خروجی در بخش تست نیز اعتبار بالا را نشان دهد. بخش آموزش دارای تفاوت اندکی است و مقدار AUC عدد ۰/۹۴۸ در بخش آموزش و ۰/۹۶۲ در بخش تست شبکه را نمایش می‌دهد (جدول ۳) که گویای این است که مدل هم در بخش آموزش و هم در بخش تست دارای اعتبار بالایی بوده و در رتبه عالی قرار گرفته و نتایج خروجی آن قابل‌اعتماد است. هم‌چنین همپوشانی مناطق خطرناک با نقشه خروجی درصد بالایی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸- نمودار اعتبار سنجی ROC

Fig.18. ROC Validation Curve

جدول ۳- مقادیر AUC
Table 3- AUC Values

Partition	Training	Testing
Model	aus	aus
Landslide	0.948	0.962

جمع‌بندی

پژوهش حاضر به بررسی و شناسایی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش در محدوده مطالعاتی جاده آستارا تا تونل نمین انجام گرفت. زمین‌لغزش یکی از پدیده‌های خطرناک در مناطق کوهستانی است که رخداد آن می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری را بر تأسیسات انسانی و محیط طبیعی وارد کند. نتایج این پژوهش نشان داد که عامل زمین‌شناسی با درصد ۰/۲۶، عامل شیب با درصد ۰/۱۶، عامل کاربری اراضی با درصد ۰/۱۴ و بیشترین تأثیر را در رخداد زمین‌لغزش در جاده آستارا تا تونل نمین دارد. قرارگیری سنگ‌های آندزیت و لایه‌های سنگ رسوبی مثل آهک و سنگ‌های تخریبی موجب شده که ساختمان دامنه‌ها در مواجهه با نیروهای دینامیک بیرونی پایداری خود را از دست بدهد. دریافت پیش حد آب به سبب بارش باران و برف باعث می‌شود که لایه سطحی دامنه‌ها اشباع‌شده و مواد روی دامنه به حالت خمیری تبدیل شود، به خاطر این که لایه‌های زیرین مقاوم بوده لایه‌های سطحی در برابر شیب دامنه به سمت پایین حرکت می‌کنند و به سبب آن زمین‌لغزش رخ می‌دهد. هم‌چنین دخالت عوامل انسانی در رخداد زمین‌لغزش در منطقه زیاد است و باعث شده که دامنه‌ها ناپایدار شود. تغییرات کاربری اراضی در منطقه به شدت بالا بوده است که بیشتر این تغییرات کاربری راضی در رخداد زمین‌لغزش در منطقه تأثیر مثبتی دارد. گسترش فرهنگ ویلا سازی در منطقه سبب شده است که بیشتر زمین‌های کشاورزی و مراتع که در پایه دامنه قرار دارد تبدیل به ویلا شود. هم‌چنین تغییرات و توسعه شبکه راه‌ها به‌ویژه در جاده آستارا تا تونل نمین در چند دهه اخیر سبب شده است که بیشتر دامنه‌های مشرف به جاده بریده‌شده و تبدیل به جاده شود، فعالیت معدن کاری در دامنه‌های جاده آستارا به تونل نمین نیز جزوه فعالیت‌های انسانی تأثیرگذار بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه است، این فعالیت به حدی است که قسمت عظیمی از دامنه به سبب استخراج مواد معدنی نابود شده است. تغییرات نا اصولی در هندسی دامنه‌ها سبب شده که تعادل مورفودینامیک دامنه‌ها به هم خورده و پاسخ آن به صورت رخداد زمین‌لغزش در منطقه دیده شود. به صورت کلی دخالت عوامل طبیعی در رخداد زمین‌لغزش در منطقه نسبت به عوامل انسانی کم بوده و روند طبیعی چرخه تغییرات سطح دامنه به صورت متعادل در حال انجام است در حالی که دخالت عوامل انسانی در این چرخه باعث شده است که روند تغییرات سرعت زیادی به خود بگیرد و رخداد زمین‌لغزش در منطقه بیشتر شود. هم‌چنین ارزیابی الگوریتم MLP نشان داد که خروجی این مدل هم در بخش آموزش و هم در بخش تست شبکه دارای اعتبار بالایی است و می‌توان در شناسایی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گیرد. آنچه این الگوریتم را متمایز کرده نوع طراحی آن است که از شبکه عصبی مغز انسان الگوبرداری شده و توانایی حل مسائل پیچیده را دارد. و در نهایت

پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی برای مطالعه و ارزیابی زمین لغزش و حرکات دامنه‌ای از مدل‌های یادگیری ماشینی و هوش مصنوعی استفاده شود.

References

- Abija, F. A., Nwosu, J. I., Ifedotun, A. I., & Osadebe, C. C. (2019). Landslide susceptibility assessment of Calabar, Nigeria using Geotechnical. *Remote Sensing and Multi-Criteria Decision Analysis: Implications for Urban Planning and Development*, 774-788. <http://dx.doi.org/10.25177/JESSES.4.6.RA.617>
- Alqadhi, S., Mallick, J., Hang, H. T., Al Asmari, A. F. S., & Kumari, R. (2024). Evaluating the influence of road construction on landslide susceptibility in Saudi Arabia's mountainous terrain: a Bayesian-optimised deep learning approach with attention mechanism and sensitivity analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(2), 3169-3194. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31352-4>
- Asghari Saraskanroud, P., & Pirizi, A. (2023). Comparative evaluation of WLC, OWA, VIKOR and MABAC multi-criteria decision making algorithms in landslide risk zoning, case study: Givi Chai basin of Ardabil province. *Natural Geography Research*, 54(1), 65-94. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jphgr.2022.333658.1007656>
- Cubito, A., Ferrara, V., & Pappalardo, G. (2005). Landslide hazard in the Nebrodi mountains (Northeastern Sicily). *Geomorphology*, 66(1-4), 359-372. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.020>
- Demuth, H. B., & Beale, M. H. (1992). *Neural Network Toolbox User's Guide*. Mathworks, Incorporated.
- Entezari, M., & Kordavani, M. (2022). Landslide hazard zoning using GIS-based methods and radar data (Case study: Fereydoon Shahr). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(33), 177-196. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/jneh.2022.38660.1810>
- Esfandiary Darabad, F., Rahimi, M., Navidfar, A., & Arsalan, M. (2020). Assessment of landslide sensitivity by neural network method and Vector machine algorithm (Case study: Heyran Road-Ardebil province). *Quantitative Geomorphological Research*, 9(3), 18-33. [In Persian] https://www.geomorphologyjournal.ir/article_122210.html
- Ghateh, S., Malekzadeh, T., & Pourghasemi, E. (2024). Landslide risk zoning using satellite images (case study: Balharud watershed, Garmsi city). *Geography and Human Relationships*, 6(3), 145-164. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gahr.2023.394638.1860>
- Hong, C., Burney, J. A., Pongratz, J., Nabel, J. E., Mueller, N. D., Jackson, R. B., & Davis, S. J. (2021). Global and regional drivers of land-use emissions in 1961–2017. *Nature*, 589(7843), 554-561. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03138-y>
- Jahandar, S., Aghagolzadeh, A., & Kazemi Tabar, S. J. (2018). Blind recognition of block codes in the presence of high noise using statistical methods. *Modern Defense Science and Technology (Non-active defense science and technology)*, 10(4), 373-381. [In Persian]

- Jouybari Moghaddam, Y., & Rostami, S. Q. (2018). Fusion of Markov Chain and SAX Method for Drought Probability Analysis (Case Study: Eastern District of Isfahan, Iran). *Environmental Management Hazards*, 5(3), 295-311. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jhsci.2018.267316.414>
- Liu, X., Shao, S., & Shao, S. (2024). Landslide susceptibility zonation using the analytical hierarchy process (AHP) in the Great Xi'an Region, China. *Scientific Reports*, 14(1), 2941. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53630-y>
- Mir, R. A., Habib, Z., Kumar, A., & Bhat, N. A. (2024). Landslide susceptibility mapping and risk assessment using total estimated susceptibility values along NH44 in Jammu and Kashmir, Western Himalaya. *Natural Hazards*, 120(5), 4257-4296. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06363-6>
- Mirzai, F., Momeni, A. A., & Abdi, Y. (2024). Landslide hazard zonation along Khorramabad-Zal Highway in Lorestan province using analytical hierarchy process (AHP). *New Findings in Applied Geology*, 18(36), 264-282. [In Persian] <https://doi.org/10.22084/nfag.2024.28365.1582>
- Mohammadi, N., & Sasanpour, F. (2021). Landslide and debris flow risk analysis in Haraz and Lavasanat roads. *Water and Soil Management and Modelling*, 1(4), 14-29. [In Persian] <https://doi.org/10.22098/mmws.2021.9138.1023>
- Mokhtari, M. (1993). Shirvan Astakhri landslide. *Geographical Research Quarterly*, 29, 117-124. [In Persian]
- Nasiri, S. (2008). *A perspective on landslides in Iran, a case study of slope instability on Haraz National Base Road*. [In Persian]
- Raja, N. B., Çiçek, I., Türkoğlu, N., Aydın, O., & Kawasaki, A. (2017). Landslide susceptibility mapping of the Sera River Basin using logistic regression model. *Natural Hazards*, 85, 1323-1346. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2591-7>
- Ranjithan, S., Eheart, J. W., & Garrett, J. H. (1995). Application of neural network in groundwater remediation under conditions of uncertainty. *New Uncertainty Concepts in Hydrology and Water Resources*, 133-140.
- Rezaei Moghaddam, M. H., Mokhtari, D., & Samandar, N. (2021). Mass movements Modeling and Motion Sensitive Zone Management Using Statistical Algorithms in Ojan Chay Basin. *Geography and Development*, 19(63), 147-174. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/j10.22111.2021.6190>
- Schalkoff, R. J. (1997). *Artificial Neural Networks*. McGraw-Hill Higher Education. New York.
- Zhao, H., Tian, W. P., Li, J. C., & Ma, B. C. (2018). Hazard zoning of trunk highway slope disasters: a case study in northern Shaanxi, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(4), 1355-1364. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1178-1>



Impact of land use types on bioavailable form of heavy metals and soil environmental pollution

Ebrahim Mahmoudabadi^{a*}, Morteza Akbari^b, Ferydoon Sarmadian^c

^aAssistant Professor, Department of Desert and Arid lands Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^bAssociate Professor, Department of Desert and Arid lands Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^cProfessors of Department of Soil Science, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

ARTICLE INFO

ARTICLE HISTORY

Received: 30 January 2024

Received in revised form :
14 June 2024

Accepted : 23 June 2024

Available online :
21 March 2025

Keywords:

SOIL POLLUTION,
HEAVY METAL
BIOAVAILABILITY,
LAND-USE
CONVERSION, SOIL
ORGANIC CARBON,
CHITGAR FOREST
PARK, DTPA
EXTRACTION,
ATOMIC
ABSORPTION
SPECTROSCOPY

ABSTRACT

These days, pollution of soils by heavy metals has become an important environmental issue. These pollutants can cause the gradual elimination of beneficial organisms from soils, which may lead to a decrease in biodiversity—a defining characteristic of the dynamics, self-regulation, balance, and stability of soil ecosystems. The total metal concentrations in the environment do not necessarily reflect environmental conditions such as bioavailability and toxicity, as these depend on soil properties. Understanding the effective processes governing the bioavailability of metals can help in modeling and assessing the environmental effects of these elements in the soil.

To investigate the influence of land use type on the bioavailability of Cu, Mn, Fe, and Zn, 116 surface soil samples were collected from Chitgar Forest Park across three land uses: coniferous forest, broadleaved forest, and rangeland. The DTPA- and nitric acid-extractable forms of Cu, Mn, Fe, and Zn, as well as soil properties such as calcium carbonate content, pH, and organic carbon, were measured.

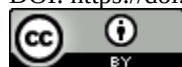
The results of the ANOVA analysis revealed that land use type significantly impacted the bioavailable forms of Cu, Mn, and Zn, whereas the available form of Fe did not differ significantly between the land uses. Additionally, land use type affected soil properties, especially soil organic carbon. Furthermore, the results of the Pearson correlation analysis showed a significant positive correlation between soil organic carbon and some heavy metals, indicating that plantation type and land use influence the availability of heavy metals in these soils.

*.Corresponding author : Dr.Ebrahim Mahmoudabadi

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

How to cite this article: Mahmoudabadi, E., Akbari, M., & Sarmadian, F. (2025). Impact of Land Use Types on Bioavailable form of Heavy Metals and soil Environmental Pollution. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), pp.61-78

DOI: <https://doi.org/10.22067/geoeh.2024.86609.1463>



©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

Pollution of soils by heavy metals has become an important environmental issue in recent years. These pollutants can cause the gradual elimination of beneficial organisms from soils, leading to decreased biodiversity—a fundamental factor in maintaining the dynamics, self-regulation, balance, and stability of soil ecosystems. Total metal concentrations in the environment do not necessarily reflect environmental conditions such as bioavailability and toxicity, as these depend on soil properties. Understanding effective processes affecting the bioavailability of metals can help in modeling and understanding the environmental effects of these elements in the soil. Studies have shown varying effects of different land uses on heavy metal concentrations, but research primarily focuses on farming, industry, or urban development. The effects of changing land use on the bioavailable forms of heavy metals remain unclear. This study aims to explore the impact of converting rangeland into broadleaf and needleleaf forests on the concentrations of bioavailable metal forms in soils over 45 years.

Material and Methods

The study area, covering 665 ha in Chitgar Forest Park, western Tehran, includes needleleaf forest (*Pinus eldarica*), broad-leaved forest (*Robinia pseudoacacia*, *Fraxinus rotundifolia*), and rangeland (*Alhagi maurorum*, *Hordeum murinum*, and other grasses). Stratified grid sampling identified 116 sites (250 × 250 m grid, 0–20 cm depth). Available forms of Zn, Cu, Mn, and Fe were determined using atomic absorption spectroscopy. Soil particle size was measured by the hydrometer method. Organic carbon, nitrogen, and total neutralizing value (TNV) were determined by wet oxidation, Kjeldahl, and volumetric methods, respectively. Electrical conductivity was measured in saturation extracts using an EC meter. The effects of different land-use types on the bioavailability of heavy metals were analyzed using one-way ANOVA.

Results and Discussion

The ANOVA analysis indicated that land-use type significantly influenced the bioavailability of Cu, Mn, and Zn, while Fe availability remained unchanged across different land uses. Soil characteristics, particularly soil organic carbon, were affected by land use, with a substantial positive correlation between soil organic carbon and certain heavy metals identified through Pearson correlation analysis. This suggests that land use and planting practices impact heavy metal concentrations in soils by affecting soil properties. Zn was more prevalent in broadleaf and needleleaf forests, whereas Mn and Cu were highest in rangelands, with rangelands having significantly more available Mn compared to needleleaf forests. Mn availability was influenced by total concentration, clay content, and organic carbon, though CaCO₃ reduced the impact of organic matter on Mn availability. Cu levels were highest in rangelands, with availability controlled by total Cu concentration, clay, and TNV. Zn concentrations were highest in broadleaf forests, strongly correlating with organic carbon. Land-use types influenced Zn concentrations through their effect on organic matter. Fe showed significant correlations with soil organic matter but did not differ significantly between land uses.

Conclusion

After forty-five years of converting rangeland into needleleaf and broadleaf forests, this study explored the availability of four heavy metals under three land uses. The results revealed significant differences in the available forms of Zn, Cu, and Mn due to the distinct effects of land-use types on soil properties. Land-use type notably influenced soil characteristics, particularly soil organic carbon. Additionally, Pearson correlation analysis identified a substantial positive relationship between soil organic carbon and heavy metals. These findings underscore the critical role of land use and planting practices in determining heavy metal availability in soils, with important implications for environmental management and agricultural practices.



تاثیر کاربری اراضی بر قابلیت جذب فلزات سنگین و آلودگی محیطی خاک

ابراهیم محمودآبادی^{۱*}، مرتضی اکبری^۲، فریدون سرمیدیان^۳

^۱استادیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۲دانشیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۳استاد گروه مهندسی علوم خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۳/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۳	آلودگی خاک ناشی از فلزات سنگین، یکی از مخاطرات مهم محیطی است که بر ویژگی اکوسیستم‌ها تاثیر گذاشته و تنوع زیستی که شرط اصلی پویایی، تعادل و پایداری اکوسیستم می‌باشد، را با مشکلات جدی روبرو می‌سازد. بنابراین، شناخت عوامل مهم در قابلیت جذب فلزات سنگین می‌تواند در مدل‌سازی و فهم تاثیرات این فلزات در خاک حائز اهمیت باشد. در پژوهش حاضر به منظور بررسی تاثیر نوع کاربری زمین بر ویژگی‌های خاک و همچنین قابلیت جذب فلزات سنگین روی، مس، منگنز و آهن، در سال ۱۳۹۰، تعداد ۱۱۶ نمونه خاک از سه کاربری جنگل پهن‌برگ، سوزنی‌برگ و مرتع در پارک چیتگر در غرب تهران، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این پژوهش فرم قابل جذب فلزات مس، روی، آهن و منگنز و همچنین ویژگی‌های درصد کربن آلی، بافت خاک، PH و درصد کربنات کلسیم نیز اندازه‌گیری شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که نوع کاربری بر مقدار منگنز، روی و مس قابل جذب اثر معنی‌داری داشت به‌طوری که مقدار روی (۴/۴۴mg/kg) در کاربری پهن‌برگ، ۲/۵ برابر نسبت به مرتع بیشتر بود. در حالی که مقدار آهن قابل جذب در بین سه نوع کاربری اختلاف معنی‌دار نشان نداد. همچنین، نوع کاربری بر خصوصیات خاک از جمله مقدار کربن آلی نیز تاثیرگذار بود. از طرف دیگر، نتایج آنالیز همبستگی بین مقادیر کربن آلی خاک و برخی از فلزات سنگین همبستگی بالایی به‌ویژه با مقدار روی قابل جذب (۰/۷۶) نشان داد. بنابراین، تغییر کاربری و کاشت جنگل از طریق تاثیر بر ویژگی‌های خاک به‌ویژه تاثیر بر مقدار ماده آلی بر زیست‌فراهمی فلزات موثر بود.
کلمات کلیدی: آلودگی خاک زیست‌فراهمی فلزات سنگین تغییر کاربری اراضی کربن آلی خاک پارک جنگلی چیتگر استخراج با DTPA طیف‌سنجی جذب اتمی	

مقدمه

آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از مشکلات اساسی زیست بوم است و مدیریت خاک‌های آلوده به این فلزات یکی از چالش‌های عمده‌ی محیط زیست به شمار می‌آید. در یک قرن گذشته (دوره آنتروپوسن) فعالیت‌های انسانی در بخش‌های مختلف صنعتی، کشاورزی و توسعه شهری سبب ورود مقادیر زیادی از آلاینده‌ها به خاک شده که سلامتی میلیون‌ها انسان را در سراسر کره زمین به مخاطره انداخته است (Aluko, Njoku, 2019; Adesuyi & Akinola, 2018; Mishra et al, 2019; Cochechi et al, 2019). به طوریکه، عمده‌ترین منابع رهاسازی فلزات سنگین به خاک، مربوط به فعالیت‌های صنعتی است که شامل؛ معدن کاوی، ذوب فلزات، صنایع آبکاری، فلزکاری، مصرف سوخت و تولید انرژی، تخلیه فاضلاب و انهدام زباله می‌باشند. علاوه برآن، کاربرد آفت‌کش‌ها، کودها و لجن فاضلاب مصرفی نیز از منابع مهم آلاینده خاک در بخش کشاورزی به شمار می‌رود (Nasrian, Akbari, Faridhosseini & Neamatollahi, 2022; Qin et al., 2021; Zhang et al., 2023). این فلزات می‌توانند از طریق گیاهان، جذب و وارد چرخه غذایی گردند. اگر چه حضور بعضی از این عناصر در حد جزئی و کم در زنجیره غذایی انسان و موجودات زنده ضروری می‌باشد، اما در غلظت‌های بیش از حد مجاز، مشکلات گوناگونی محیطی و زیستی همچون مسمومیت و سرطان را به همراه خواهد داشت (Kamunda, 2023; Mathuthu & Madhuku, 2016; Kashtabeh, Akbari, Heidari & Najafpour, 2023). غلظت کل فلز در خاک ضرورتاً درجه سمیت یا زیست‌فراهمی‌اش را منعکس نمی‌کند. زیرا زیست‌فراهمی فلزات سنگین بطور زیادی به شرایط محیطی منطقه بستگی دارد (Palansooriya et al., 2020). این موضوع ارزیابی دقیق مقدار خطر ایجاد شده بوسیله فلزات را مشکل می‌کند. به عنوان مثال زیست‌فراهمی کادمیم و فلزات سمی در خاک به وسیله غلظت کل و فاکتورهای خاکی از قبیل pH (Hussain, Ashraf, Abbas, Li & Farooq, 2021; Palansooriya et al., 2020; Cao et al., 2022; Yang et al., 2024) مقدار ماده آلی و مقدار رس خاک (Yang et al., 2024) و درصد کربنات خاک (Renella et al., 2004; Palansooriya et al., 2020) کنترل می‌گردد. تغییر شرایط محیطی از قبیل تغییر نوع کاربری زمین و تغییر اقلیم و همچنین اشباع خاک توسط فلز بیش از ظرفیت بافری آن می‌تواند باعث تحرک فلزات سنگین در خاک گردد (Huang & Jin, 2008; He et al., 2023).

پژوهش‌های زیادی، تأثیر نوع کاربری را بر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک گزارش کرده‌اند (Masha, 2009; Belayneh, Bojago, Tadiwos & Dessalegn, 2023; Molla, Getnet & Mekonnen, 2022; Asmare, Busse et al., 2023). برای مثال در مطالعه‌ای که توسط بوسی و همکاران (Abayneh, Yigzaw & Birhan, 2023) انجام شده است، مشخص گردید که خاک‌های جنگلی با ترسیب کربن سبب بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله حاصلخیزی رویشگاه و بهبود ساختمان‌سازی شده است. کامپین و همکاران (Kumpiene, Lagerkvist & Maurice, 2008) نیز نشان دادند که مواد آلی با داشتن گروه‌های عاملی نظیر،

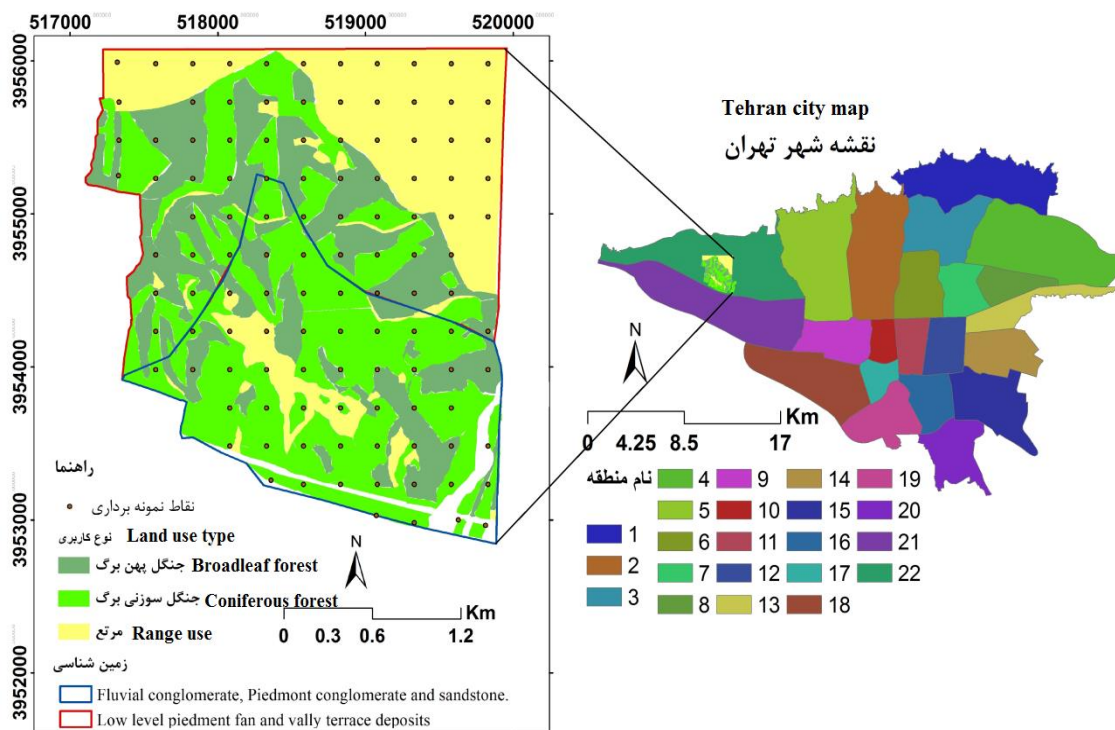
کربونیل‌ها، فنیل‌ها، هیدروکسیدها و آمین‌ها قادرند با فلزات سنگین وارد واکنش شوند. در مطالعه انجام شده توسط مارچاند و همکاران (Marchand, Allenbach & Lallier-Vergès, 2011)، در مورد رابطه بین پراکنش فلزات سنگین و چرخه مواد آلی در رسوبات جنگل ماندابی، جنگل تخریب شده حرا^۱ و زمین‌های بایر اطراف آن، رفتار فلزات کرم، مس و نیکل در خاک در ارتباط با مقدار کربن آلی خاک بوده است. که این موضوع نیز توسط چن و همکاران (Chen, Kao, Chen & Dong, 2007)، در جنگل‌های تایوان بررسی شده است. امینی و همکاران (Amini, Khademi, Afyuni & Abbaspour, 2005)، در بررسی نوع کاربری اراضی بر میزان کادمیوم قابل جذب، نشان دادند که نوع کاربری بر میزان جذب کادمیوم تاثیر نداشته است. اما قشلاقی و همکاران (Qishlaqi, Moore & Forghani, 2009)، در مطالعه خود نشان دادند که مقدار فلزات سنگین در خاک سطحی در دو نوع کاربری از نظر آماری تفاوت معنی‌داری داشته و میانگین فلزات سنگین در خاک سطحی زراعی بیشتر از خاک چمنزار بود. نتایج آنها نشان داد که نیکل، کرم، آهن، منگنز و مقدار رس تحت تاثیر منابع زمین‌شناسی بوده است. در بررسی کائو و همکاران (Cao et al., 2022) نیز که تفاوت معنی‌داری در کاربری‌های مختلف از نظر مقدار قابل جذب عناصر سنگین وجود داشت که دلیل آن به تفاوت در میزان مواد آلی خاک نسبت داده شد. در جنگل‌های کارپانتیانس اوکراین، جنگل بلوط آلودگی بیشتری نسبت به جنگل راش و جنگل همیشه‌سبز نشان داده که این به دلیل محل صنایع آن منطقه بوده است. به طوریکه سه عنصر نیکل، منگنز و کادمیوم در خاک جنگل سوزنی‌برگ بیشتر از جنگل بلوط و سپس جنگل راش دیده شده است (Shparyk & Parpan, 2004). در مقایسه مقدار کربنات کلسیم در کاربری‌های مختلف می‌توان به مطالعه توبا و همکاران (Tufa, 2004) اشاره نمود که در پژوهش خود نشان دادند که دو کاربری اراضی جنگلی و علفزار نسبت به اراضی کشت شده و چرا شده به طور معنی‌داری مقدار کربنات کلسیم بیشتری دارند. به طوریکه بالا بودن مقدار کربنات کلسیم در خاک می‌تواند باعث افزایش pH خاک نیز بشود (Fageria & Baligar, 2008). بنابراین، شناخت فرایندهایی که بتواند حرکت فلزات سنگین و قابلیت استفاده آنها را برای گیاهان در خاک کنترل نماید، برای پیش‌بینی تاثیرات محیطی فلزات سنگین ضروری است (El Fadili, Ali, Rahman, El Mahi & Louki, 2024). با توجه به مطالعات گذشته می‌توان پی برد که ویژگی‌های خاک از قبیل pH، مقدار و نوع کانی‌های رسی، مقدار و نوع ماده آلی و مقدار رطوبت و ترکیب محلول خاک، واکنش‌های رسوب و فراهمی فلزات را در محلول خاک تعیین می‌کنند (Kumpiene et al., 2008; Qin et al., 2021). از طرف دیگر این ویژگی‌ها تحت تاثیر نوع کاربری اراضی قرار دارند. اگرچه تاثیر کاربری اراضی بر ویژگی‌های خاک به خوبی شناخته شده است و همچنین مطالعات زیادی بر روی تاثیر کاربری اراضی بر مقدار کل فلزات سنگین انجام گرفته است، با این حال تاکنون مطالعات کمی در ارتباط با تاثیر کاربری اراضی بر فرم قابل جذب فلزات سنگین در یک ناحیه صنعتی و مسکونی شهری صورت گرفته است. لذا، این مطالعه با هدف بررسی تاثیر کاربری اراضی بر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک و همچنین فرم قابل جذب چهار فلز روی، مس، منگنز و آهن در پارک جنگلی چیتگر که در منطقه مسکونی و در کنار ناحیه صنعتی در شهر تهران بود، صورت گرفت.

معرفی منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در منطقه‌ای به وسعت حدود ۷۰۰ هکتار واقع شده در طول جغرافیایی $51^{\circ}11'30.07''E$ تا $51^{\circ}13'9.34''E$ و عرض جغرافیایی $35^{\circ}43'14.17''N$ تا $35^{\circ}44'51.71''N$ در غرب شهر تهران و در بخشی از پارک جنگلی چیتگر به همراه زمین‌های اطراف آن بود. پارک چیتگر در کنار اراضی مسکونی منطقه ۲۲ تهران و در کنار ناحیه صنعتی واقع شده در بین کرج و تهران قرار گرفته است. اراضی منطقه بر روی سازند هزار دره واقع شده‌اند. سازند هزار دره از کنگلومرای همگن یا قلوله‌سنگ، شن و ریگ تشکیل شده است و فضای میان دانه‌ها را ماسه و سیلت و رس پر کرده است. این سازند سیلابی بوده ولی در حال حاضر مورفولوژی رودخانه اصلی آن قابل تشخیص نیست. از نظر شیب منطقه چیتگر در نقاط مختلف خود دارای پستی و بلندیهای بسیار است که در ارتباط با مناطق مختلف، نوسانات شیب زیاد است و تا ۸۰ درصد می‌رسد. خاکهای منطقه با رژیم حرارتی ترمیک و رژیم رطوبتی اریدیک در دو رده اریدیسول و انتی‌سول رده بندی شدند. کاربری اراضی قبل از سال ۱۳۴۵ به صورت مرتع بوده و بعد از ایجاد پارک در قسمتهای مختلف آن کاشت درختان پهن برگ و سوزنی برگ صورت گرفته است (Pour Hashemi, 1997).

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، سه نوع کاربری شامل؛ مرتع، جنگل پهن برگ و جنگل سوزنی برگ انتخاب و نمونه برداری از عمق سطحی خاک (۰-۲۰ سانتیمتر) با فاصله ۲۵۰ متر از یکدیگر و به شکل شبکه منظم از این سه کاربری صورت گرفت (شکل ۱). در مجموع از تعداد ۱۱۶ نمونه خاک سطحی برداشته شده، از کاربری جنگل پهن‌برگ ۲۹ نمونه خاک، از کاربری مرتع ۳۲ نمونه و ۵۵ نمونه از کاربری جنگل سوزنی‌برگ بدست آمد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شهر تهران، نقشه نوع کاربری و زمین شناسی و مکان نمونه برداری

Fig.1. Geographical location of the study area in Tehran, land use type and geological map, and sampling location

آنالیزهای آزمایشگاهی و آماری

در ابتدا، در آزمایشگاه پس از هوا خشک کردن نمونه‌ها، کوبیده و از الک با مش ۱۰ عبور داده شدند و سپس میزان ماده آلی با روش والکی بلاک، بافت خاک با روش هیدرومتری، هدایت الکتریکی و واکنش خاک در عصاره اشباع توسط هدایت سنج و pH متر، مقدار نیتروژن کل خاک با روش کج‌لدال در نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شدند (Pansu, 2006). برای تعیین میزان فرم قابل جذب فلزات روی، منگنز، مس و آهن از روش عصاره‌گیری با DTPA^1 به روش لیندزی صورت گرفت (Lindsay & Norwell, 1978). همچنین برای اندازه‌گیری فرم کل عناصر از اسید نیتریک ۴ نرمال برای عصاره‌گیری از نمونه‌ها استفاده شد و با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل Shimadzu (AA. 670) مقدار فلزات روی، مس، آهن و منگنز اندازه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها در محیط نرم افزاری SPSS v16 صورت گرفت بدین صورت که ابتدا با توجه به چولگی و نتایج تست

1 Diethylene triamine pentaacetic acid

نرمالیتی کولوموگرواف اسمیرنوف نرمال بودن داده ها مورد بررسی قرار گرفت. سپس تاثیر کاربری اراضی بر ویژگیهای خاک و فلزات سنگین طبق طرح کاملاً تصادفی نامتعادل و از طریق جدول تجزیه واریانس (ANOVA) و مقایسه میانگین‌ها از طریق آزمون کمترین تفاوت معنی‌دار (LSD) صورت گرفت. ارتباط و تاثیر ویژگیهای خاک با زیست فراهمی فلزات با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون صورت گرفت.

نتایج و بحث

پس از جمع‌آوری داده‌ها، توصیف‌های آماری آنها شامل میانگین، واریانس، مقادیر ماکزیمم و مینیمم، کشفیدگی، چولگی و درصد ضریب تغییرات صورت گرفت که نتایج آماری مربوط به خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاکهای مورد بررسی در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به چولگی و نتایج تست نرمالیتی کولوموگرواف اسمیرنوف مشخص شد که تمامی خصوصیات مورد بررسی به جز PH خاک و نسبت کربن به نیتروژن از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند. بنابراین تغییر شکل داده‌ها به شکل لگاریتمی و ریشه مربعات به منظور نرمال سازی صورت گرفت.

جدول ۱- خلاصه آماری مربوط به خصوصیات شیمیایی و فیزیکی و مقادیر قابل جذب فلزات سنگین خاک

Table 1- Summary of Statistics on Soil Chemical and Physical Properties and Heavy Metals

ضریب تغییرات Coefficient of variation	کشفیدگی Erratum	چولگی Skewness	انحراف معیار Standard deviation	میانگین Mean	ماکزیمم Max.	مینیمم Min.	تعداد Num.	متغیر Variable
0.35	1.57	1.16	7.47	22.09	45	10.72	116	رس Clay
0.03	-0.45	-0.12	0.06	8.37	8.90	7.80	116	pH
0.77	0.05	1.04	0.68	1.08	3.10	0.09	116	درصد کربن آلی Organic carbon %
0.45	-0.39	0.31	17.61	9.34	20.53	1.33	116	نسبت C:N*
0.52	-0.01	0.84	5.32	10.24	25.53	2.87	116	CaCO ₃ **
28.07	-0.84	-0.14	1.25	4.00	6.53	1.60	116	Fe(mg/kg)
24.30	-0.17	0.50	31.92	16.47	31.92	5.70	116	Mn(mg/kg)
32.65	-0.12	0.70	0.08	0.87	1.60	0.42	116	Cu(mg/kg)
63.63	-1.24	0.42	4.49	3.33	7.80	0.40	116	Zn(kg/kg)

* نسبت کربن به نیتروژن ** کربنات کلسیم معادل

نتایج حاصل از تجزیه واریانس یک طرفه فاکتورهای خاک نشان داد که درصد کربن آلی، نسبت کربن به نیتروژن و درصد اندازه ذرات در سطح یک درصد در بین کاربری‌ها معنی‌دار بود ($p < 0.01$). همچنین درصد کربنات کلسیم خاک نیز در بین سه نوع کاربری تفاوت معنی‌داری ($p < 0.05$) نشان داد. این در حالی بود که مقدار pH اختلاف معنی‌داری نشان نداد (جدول ۲). در مورد مقدار فلزات سنگین نیز مقدار مس، روی و منگنز در بین کاربری‌ها اختلاف معنی‌دار ($p < 0.01$) نشان داد ولی برای مقدار آهن قابل جذب اختلاف معنی‌داری بین کاربری‌ها مشاهده نگردید.

جدول ۲- آنالیز واریانس یک طرفه صفات و مقدار قابل جذب فلزات خاک در کاربری‌های مختلف

Table 2- Analysis of variance of soil properties and available heavy metal in different land uses

Zn	Cu	Mn	Fe	CaCO ₃	C/N	OC	pH	درصد رس Percentage of clay	منابع تغییرات Sources of changes
5.8**	0.625**	11.695**	3	107.8*	19.74**	51.295**	0.015	874.1**	پوشش Cover
0.089	0.08	34.18	1.35	26.85	14.36	0.011	0.057	45.8	خطا Error
33.06	34.3	35.5	2.98	50.6	40.56	33.7	2.85	30.63	ضریب تغییرات Coefficient of Variation

*و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح پنج و یک درصد

اثر نوع کاربری بر خصوصیات شیمیایی خاک

بر اساس جدول مقایسه میانگین (جدول ۳) دو کاربری جنگل سوزنی برگ و پهن برگ در مقدار میانگین خصوصیات شیمیایی مورد بررسی به جز درصد کربن آلی خاک تفاوت معنی‌دار نشان ندادند. اما مقدار کربن آلی خاک در هر سه کاربری تفاوت معنی‌دار نشان داد بر این اساس بیشترین مقدار کربن در کاربری جنگل پهن‌برگ با میانگین ۲/۷ بود که نسبت به کاربری سوزنی برگ با میانگین ۱/۶ و کاربری مرتع با میانگین ۰/۸ اختلاف معنی‌داری نشان داد.

جدول ۳- مقایسه میانگین مقادیر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و فلزات سنگین خاک در انواع کاربری‌ها

Table 3- Comparison of mean of physical and chemical properties and metals in different land uses

نوع کاربری Land use type	pH	CaCO ₃	OC	C:N	درصد رس Percentage of clay	مس Cu	آهن Fe	منگنز Mn	روی Zn
کاربری مرتع Range use	8.4a	8.1b	0.8c	6.3b	28.4a	1.03a	4.00a	18.69a	1.71b
جنگل پهن‌برگ Broadleaf forest	8.4a	11.7a	2.7a	11.2a	19.4b	0.83b	3.65a	16.62ab	4.44a
جنگل سوزنی‌برگ Coniferous forest	8.3a	10.8a	1.6b	10.0a	19.9b	0.79b	4.18a	15.10b	3.68a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار (P < 0.05) می‌باشند.

به دلیل بالا بودن میزان نیتروژن در کاربری پهن برگ به دلیل وجود گونه‌های تثبیت کننده ازت نظیر افاقیا، نسبت کربن به نیتروژن در این کاربری با جنگل سوزنی برگ اختلاف معنی‌داری نشان نداد. اما این دو کاربری نسبت به کاربری مرتع درصد کربن به نیتروژن بالایی نشان دادند. این موضوع در مطالعات هی و همکاران (He et al., 2023)، نیز اشاره شده است که نسبت کربن به نیتروژن خاک می‌تواند تحت تأثیر نوع جامعه گیاهی مستقر بر روی خاک باشد و در مناطق با پوشش درختی نسبت به نواحی بوته زار این نسبت نیز بیشتر خواهد بود.

در ارتباط با میزان کربنات کلسیم، نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین درصد کربنات کلسیم مربوط به کاربری جنگل پهن‌برگ و سوزنی بوده است که با کاربری مرتع تفاوت معنی‌داری نشان دادند. نتایج مطالعات توف و همکاران (Tufa et al., 2019)، نیز این موضوع را تایید می‌کنند که مقدار کربنات کلسیم در کاربری‌های مختلف، متفاوت بوده و در اراضی با کاربری جنگل و علفزار نسبت به اراضی کشت شده و چرا شده مقدار کربنات کلسیم به طور معنی‌داری بیشتر دیده شده است.

در ارتباط با درصد رس، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که بیشترین درصد رس خاک مربوط به کاربری مرتع است که نسبت به دو کاربری دیگر اختلاف معنی‌دار نشان داد (جدول ۳).

تأثیر کاربری بر مقدار قابل جذب فلزات سنگین

بر اساس جدول تجزیه واریانس، به جز آهن قابل جذب، سه نوع کاربری از نظر مقدار غلظت منگنز، روی و مس اختلاف معنی‌دار نشان دادند. بر اساس جدول مقایسه میانگین (جدول ۳)، بیشترین غلظت منگنز قابل جذب در بین کاربری‌ها، در کاربری مرتع بود که این کاربری با کاربری جنگل پهن برگ اختلاف معنی‌دار نشان نداد ولی با کاربری سوزنی برگ تفاوت معنی‌دار داشت. همچنین مقدار مس قابل جذب نیز در کاربری مرتع بالاترین غلظت را نشان داد به طوری که نسبت به دو کاربری جنگل سوزنی و پهن برگ اختلاف معنی‌دار بود. ولی بین کاربری جنگل سوزنی و جنگل پهن‌برگ اختلاف معنی‌داری دیده نشد. مقدار منگنز قابل استخراج با DTPA با مقدار رس خاک ضریب رگرسیون بالایی نشان داد (جدول ۴).

جدول ۴- مقادیر ضریب همبستگی پیرسون بین خصوصیات خاک و مقادیر قابل جذب فلزات سنگین
 Table 4- Pearson correlation coefficients between soil properties and available heavy metal concentrations

	pH	CaCO ₃	Clay	OC	C/N	Zn	Cu	Mn	Fe
pH	1								
CaCO ₃	0.184ns	1							
Clay	0.117ns	-0.049ns	1						
OC	0.063ns	.232*	-.195*	1					
C/N	0.127ns	.239*	-.223*	.762**	1				
Zn	-0.004ns	.197*	-.251**	.762**	.611**	1			
Cu	.227*	-.316**	.494**	0.087ns	-0.031	.197*	1		
Mn	0.111ns	-.215*	.452**	.206*	0.126ns	.307**	.560**	1	
Fe	0.099ns	-.275**	0.026ns	.218*	0.14ns	.394**	.345**	.496**	1

* و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح پنج و یک درصد

بر اساس ضریب همبستگی پیرسون فرم قابل استخراج با DTPA منگنز همبستگی شدیدی با مقدار کل منگنز خاک نشان داد. همچنین همبستگی بین مقدار رس خاک و مقدار کل منگنز بسیار شدید و معنی‌دار بود. از طرفی درصد رس خاک در کاربری مرتع بالا بود که این امر سبب افزایش زیست‌فراهمی منگنز در خاک شده است. بنابراین همبستگی مثبت بین مقدار رس خاک و فرم قابل استخراج با DTPA را می‌توان به همبستگی مقدار کل منگنز و رس خاک نسبت داد. تحقیقات زیادی تأثیرپذیری زیست‌فراهمی فلزات سنگین را از مقدار کل آنها در خاک نشان داده‌اند (Peijnenburg et al., 2020; Zhu, Ji, Tang, Wang & Sun, 2023). مقدار فراهمی مس را می‌توان ناشی از خصوصیات ذاتی خاک و تأثیر کاربری عنوان نمود. به نظر می‌رسد تأثیر کاربری از طریق تأثیر بر مقدار کربنات کلسیم باعث تغییر در فراهمی عنصر مس در خاک شده است. مقدار مس قابل استخراج با DTPA با فاکتور درصد رس و مقدار کربنات کلسیم بر اساس رگرسیون گام به گام بیشترین همبستگی را نشان داد. که این ضریب برای درصد رس مثبت و برای مقدار کربنات کلسیم منفی به دست آمد. با توجه به همبستگی بالای مقدار مس کل و مس قابل استخراج با DTPA، همچنین همبستگی مثبت و شدید این عنصر با مقدار رس و همچنین همبستگی منفی مقدار مس و کربنات کلسیم را در ارتباط با مقدار کل مس در کانی‌های رسی و کم بودن مقدار مس در کانی‌های حاوی کربنات دانست. همبستگی مثبت و شدید بین مقدار منگنز و مس قابل جذب نیز منشأ یکسان را برای این دو عنصر در خاک‌های این منطقه نشان می‌دهد. زین و همکاران (Zinn, de Faria, de Araujo & Skorupa, 2020)، نشان دادند که مواد مادری سهم بسیار مهمی در مقادیر قابل جذب فلزات سنگین در خاک دارند. به نظر می‌رسد رس خاک از طریق کاهش آبشویی مس و منگنز نیز باعث افزایش این عناصر در خاک شده است همبستگی شدید فرم قابل جذب و مقدار منگنز کل خاک نیز تایید کننده این امر می‌باشد. پیچینبرگ و همکاران (Peijnenburg et al., 2020)، اظهار داشتند که بیشترین میزان انتقال فلزات سنگین در خاک‌های شنی اسیدی با میزان مواد آلی کم وجود دارد که فاکتورهای

تأثیرگذار بر روی تحرک فلزات سنگین در خاک، مثل رس‌ها، شدت بارندگی یا آبیاری، میزان مواد آلی خاک و اسیدیته محلول در کاهش آبشویی موثر باشند.

در مورد عنصر روی قابل جذب بر اساس جدول مقایسه میانگین، بیشترین غلظت این عنصر در جنگل پهن‌برگ و سوزنی‌برگ مشاهده گردید. در حالی که این دو کاربری اختلاف معنی‌داری در مقدار روی قابل جذب در خاک خود نشان ندادند ولی هر دو کاربری نسبت به کاربری مرتع مقدار بیشتری را نشان دادند با توجه به جدول ۴ ضریب همبستگی پیرسون، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین درصد کربن آلی خاک و فرم قابل جذب روی وجود داشت. مقدار تجمع بالاتر کربن آلی در کاربری‌های جنگل سوزنی‌برگ و پهن‌برگ را می‌توان دلیل بالاتر بودن روی قابل جذب در این دو کاربری دانست. اثر مواد آلی بر روی فلزات سنگین، بسته به ترکیبات آن‌ها و فرآیندهایی که ممکن است در اثر اضافه کردن این مواد ایجاد گردد با هم متفاوت است. جذب یکی از مهمترین عوامل تعیین‌کننده غلظت روی در خاک‌ها بوده و تحت تأثیر عواملی مانند PH، نوع کانی رس، CEC، مواد آلی خاک و نوع خاک است (Bradl, 2004; Ondrasek & Rengel, 2012; Younas, Fatima, Ahmad, 2023; Ayyaz, 2023). ادو و همکاران (Udo, Bohn & Tucker, 1970)، و تانهان همکاران (Tanhan, Kruatrachue, Pokethitiyook & Chaiyarat, 2007)، همبستگی زیادی بین روی خاک و مقدار مواد آلی مشاهده کردند و نتیجه گرفتند که مواد آلی یک جزء مهم در نگهداری روی در خاک‌های آهکی است. اما از طرفی پیوند قوی فلز به یک ماده آلی با جرم مولکولی کم مانند اسید فولویک، به‌طور محسوسی حلالیت و تحرک فلز را در خاک افزایش می‌دهد (Holm et al., 1998). کلیک و همکاران (Klik, Gusiatin & Kulikowska, 2021)، نشان دادند که ترکیبات آلی و مواد هیومیک حلال موجود در لجن فاضلاب از طریق ایجاد کلات به مقدار زیادی در انحلال عنصر روی موثر بودند. سینگ و همکاران (Singh, Mohan, Sinha & Dalwani, 2004)، گزارش کردند که مقادیر روی، مس، آهن و منگنز در خاک تیمار شده با کود دامی به شدت افزایش می‌یابد. مقدار روی قابل استخراج با DTPA در دو کاربری جنگل سوزنی‌برگ و جنگل پهن‌برگ با مقدار کربن آلی ضریب رگرسیون بالایی را نشان داد که این موضوع توسط برادل (Bradl, 2004) به این صورت توضیح داده شده که عوامل کی‌لیت‌کننده نقش مهمی در تحریک روی خاک دارند. وانگ و همکاران (Wang, Xu, Fu & Chen, 2021) بیان داشتند که عوامل کی‌لیت‌کننده مواد آلی قدرت بالایی در استخراج فلزات در پیوند با کربنات‌ها و کانیهای خاک دارند. این فلزات در حالت عادی به دلیل پیوند یونی قوی که با کانیهای خاک مثل کربنات‌ها دارند، تثبیت شده اند و عوامل کلیت‌کننده قادر به استخراج و جداسازی آنها از خاک می باشند. حضور اسیدهای آلی در محلول خاک باعث کاهش جذب روی توسط خاک شده، روی با مولکولهای آلی تشکیل کمپلکس‌های پایداری می‌دهد بنابراین تمایل روی برای جذب توسط سایت‌ها کاهش می‌یابد و باعث افزایش مقدار روی قابل استخراج با DTPA می‌شود. کائو و همکاران (Cao et al., 2022) نیز ماده آلی را به عنوان مهمترین حامل فرم حل شده فلزات سنگین عنوان کردند. به طوری که کاربری جنگل به دلیل کمتر بودن ماده آلی نسبت به شالیزار مقدار کمتری از فرم قابل جذب فلزات سنگین را داشت. بر اساس مطالعات لی و همکاران (Li, Liang, Han & Yang, 2013) و تائو و همکاران (Tao, Hou, Yang & Li, 2016)، ترشحات ریشه گیاه

در بیشتر موارد از طریق کاهش pH خاک، تغییر پتانسیل ردوکس خاک و کمپلکس شدن با لیگاندهای آلی، تحرک فلزات سنگین را در خاک افزایش می دهد و نوع کاربری متفاوت به دلیل پوشش گیاهی متفاوت می تواند نوع و مقدار ترشحات ریشه را تحت تاثیر قرار دهد و بر مقدار فراهمی عناصر سنگین موثر واقع شود. در بررسی اثر کاربری بر مقدار آهن قابل جذب، هرچند آهن قابل جذب در کاربری سوزنی برگ غلظت بالاتری نشان داد اما اختلاف بین کاربری ها معنی دار نبود. با مراجعه به جدول ضریب همبستگی (جدول ۴) مقدار آهن قابل جذب فقط با مقدار کربنات کلسیم همبستگی معنی داری را نشان داد. با توجه به این موضوع تغییرات مقدار آهن قابل جذب در سطح منطقه را باید تحت تاثیر فاکتورهایی دانست که در سطح منطقه یکسان عمل کرده اند و وابسته به نوع کاربری اراضی نیستند که این فاکتورها غلظت آهن قابل جذب را کنترل می کنند. بنابراین مقدار فرم قابل جذب آهن را می توان به مقدار یکسان آهن در کانیهای سطح منطقه نسبت داد.

نتیجه گیری

جنگل کاری در منطقه مورد مطالعه باعث تغییر در ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه شده بود. به طوری که تاثیر جنگل پهن برگ نسبت به جنگل سوزنی برگ مشهودتر بود. تغییر کاربری مرتع به جنگل باعث افزایش مقدار کربن آلی و مقدار نیتروژن کل در هر دو نوع جنگل سوزنی برگ و پهن برگ شده بود. اثر کاربری بر مقدار کربنات کلسیم نیز معنی دار بود. در مجموع تاثیر کاربری بر این خصوصیات باعث تغییر در فراهمی عناصر روی، مس و منگنز در خاک شده بود. در حالی که اثر کاربری اراضی بر مقدار آهن قابل جذب تاثیر نداشت و این عنصر تحت تاثیر خصوصیات ذاتی خاک قرار داشت. نتایج این پژوهش بیانگر آنست که نوع کاربری بیشترین تاثیر را بر عنصر روی داشت. کاشت درخت و در نتیجه افزایش مقدار کربن آلی خاک در کاربری جنگل پهن برگ و سوزنی برگ سبب افزایش قابل توجه زیست فراهمی روی نسبت به کاربری مرتع شده بود. مقدار منگنز و مس خاک نیز به صورت توأمان از کاربری اراضی و خصوصیات ذاتی خاک تاثیر پذیرفته بودند. نتایج این پژوهش نشان داد که در صورت تغییر کاربری اراضی از شرایط طبیعی و مرتعی به درختکاری و جنگلکاری مقدار فرم قابل جذب فلزات سنگین در خاک می تواند تغییر کند. بنابراین پیشنهاد می شود که در برنامه ریزی تغییر کاربری اراضی به خصوص اراضی نزدیک به نواحی صنعتی که قرار است در آینده در جهت تولید محصول استفاده شوند، پتانسیل افزایش مقدار قابلیت جذب فلزات سنگین با تغییر کاربری در نظر گرفته شود.

References

- Aluko, T., Njoku, K., Adesuyi, A., & Akinola, M. (2018). Health risk assessment of heavy metals in soil from the iron mines of Itakpe and Agbaja, Kogi State, Nigeria. *Pollution*, 4(3), 527-538. <https://doi.org/10.22059/poll.2018.243543.330>
- Amini, M., Khademi, H., Afyuni, M., & Abbaspour, K. C. (2005). Variability of available cadmium in relation to soil properties and landuse in an arid region in central Iran. *Water, Air, and Soil Pollution*, 162, 205-218. <https://doi.org/10.1007/s11270-005-6273-4>
- Andersen, M. K., Refsgaard, A., Raulund-Rasmussen, K., Strobel, B. W., & Hansen, H. C. (2002). Content, distribution, and solubility of cadmium in arable and forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1829-1835. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1829>
- Asmare, T. K., Abayneh, B., Yigzaw, M., & Birhan, T. A. (2023). The effect of land use type on selected soil physicochemical properties in Shihatig watershed, Dabat district, Northwest Ethiopia. *Heliyon*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16038>
- Bradl, H. B. (2004). Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Journal of Colloid and Interface Science*, 277(1), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.04.005>
- Busse, M. D., Sanchez, F. G., Ratcliff, A. W., Butnor, J. R., Carter, E. A., & Powers, R. F. (2009). Soil carbon sequestration and changes in fungal and bacterial biomass following incorporation of forest residues. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(2), 220-227. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.10.012>
- Cao, L., Li, W., Deng, H., Wang, W., Liang, Y., Wei, Z., ... & Tan, W. (2022). Effect of land use pattern on the bioavailability of heavy metals: A case study with a multi-surface model. *Chemosphere*, 307, 135842. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135842>
- Chen, C. W., Kao, C. M., Chen, C. F., & Dong, C. D. (2007). Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan. *Chemosphere*, 66(8), 1431-1440. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.030>
- Cocheci, R. M., Ianos, I., Sarbu, C. N., Sorensen, A., Saghin, I., & Secareanu, G. (2019). Assessing environmental fragility in a mining area for specific spatial planning purposes. *Moravian Geographical Reports*, 27(3), 169-82. <https://doi.org/10.2478/mgr-2019-0013>
- El Fadili, H., Ali, M. B., Rahman, M. N., El Mahi, M., & Louki, S. (2024). Bioavailability and health risk of pollutants around a controlled landfill in Morocco: Synergistic effects of landfilling and intensive agriculture. *Heliyon*, 10(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23729>
- Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2008). Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production. *Advances in Agronomy*, 99, 345-399. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00407-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00407-0)
- He, J., Chen, B., Xu, W., Xiang, C., Kuang, W., & Zhao, X. (2023). Driving factors for soil C: N ratio in woody plant communities across northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Catena*, 233, 107504. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107504>
- Holm, P. E., Christensen, T. H., Lorenz, S. E., Hamon, R. E., Domingues, H. C., Sequeira, E. M., & McGrath, S. P. (1998). Measured soil water concentrations of cadmium and zinc in plant

- pots and estimated leaching outflows from contaminated soils. *Water, Air, and Soil Pollution*, 102, 105-115. <https://doi.org/10.1023/A:1004964200904>
- Huang, S. W., & Jin, J. Y. (2008). Status of heavy metals in agricultural soils as affected by different patterns of land use. *Environmental Monitoring and Assessment*, 139, 317-327. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9838-4>
- Hussain, B., Ashraf, M. N., Abbas, A., Li, J., & Farooq, M. (2021). Cadmium stress in paddy fields: effects of soil conditions and remediation strategies. *Science of The Total Environment*, 754, 142188. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142188>
- Kabata-Pendias, A. (2000). *Trace elements in soils and plants*. CRC press, Boca Raton.
- Kamunda, C., Mathuthu, M., & Madhuku, M. (2016). Health risk assessment of heavy metals in soils from Witwatersrand Gold Mining Basin, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(7), 663. <https://doi.org/10.3390/ijerph13070663>
- Kashtabeh, R., Akbari, M., Heidari, A., & Najafpour, A. (2023). Impact of Iron Ore Mining on the Concentration of some Heavy Metals and Soil Pollution Zoning (Case Study: Sangan Iron Ore Mine, Khaf-Iran). *Water and Soil*, 37(1), 77-94. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.79471.1219>
- Klik, B., Gusiati, Z. M., & Kulikowska, D. (2021). A holistic approach to remediation of soil contaminated with Cu, Pb and Zn with sewage sludge-derived washing agents and synthetic chelator. *Journal of Cleaner Production*, 311, 127664. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127664>
- Kumpiene, J., Lagerkvist, A., & Maurice, C. (2008). Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments—a review. *Waste Management*, 28(1), 215-225. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.012>
- Li, T., Liang, C., Han, X., & Yang, X. (2013). Mobilization of cadmium by dissolved organic matter in the rhizosphere of hyperaccumulator *Sedum alfredii*. *Chemosphere*, 91(7), 970-976. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.100>
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil science society of America journal*, 42(3), 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
- Marchand, C., Allenbach, M., & Lallier-Vergès, E. (2011). Relationships between heavy metals distribution and organic matter cycling in mangrove sediments (Conception Bay, New Caledonia). *Geoderma*, 160(3-4), 444-456. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.10.015>
- Masha, M., Belayneh, M., Bojago, E., Tadiwos, S., & Dessalegn, A. (2023). Impacts of land-use and topography on soil physicochemical properties in the Wamancho watershed, Southern Ethiopia. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100854. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100854>
- McBride, M., Sauve, S., & Hendershot, W. (1997). Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. *European Journal of Soil Science*, 48(2), 337-346. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00554.x>

- Mishra, S., Bharagava, R. N., More, N., Yadav, A., Zainith, S., Mani, S., & Chowdhary, P. (2019). Heavy metal contamination: an alarming threat to environment and human health. *Environmental Biotechnology: For Sustainable Future*, 103-125. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7284-0_5
- Molla, E., Getnet, K., & Mekonnen, M. (2022). Land use change and its effect on selected soil properties in the northwest highlands of Ethiopia. *Heliyon*, 8(8), 10157. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10157>
- Nasrian, A., Akbari, M., Faridhosseini, A., & Neamatollahi, E. (2022). Spatio-temporal monitoring of groundwater changes on desertification intensity in agricultural areas in Dargaz plain, Khorasan Razavi province. *Desert Ecosystem Engineering*, 7(21), 75-90. [In Persian] https://deej.kashanu.ac.ir/article_112660_en.html?
- Ondrasek, G., & Rengel, Z. (2012). The role of soil organic matter in trace element bioavailability and toxicity. *Abiotic Stress Responses in Plants: Metabolism, Productivity and Sustainability*, 403-423. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0634-1_22
- Palansooriya, K. N., Shaheen, S. M., Chen, S. S., Tsang, D. C., Hashimoto, Y., Hou, D., ... & Ok, Y. S. (2020). Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review. *Environment International*, 134, 105046. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105046>
- Pansu, M. (2006). *Handbook of soil analysis*. Springer.
- Peijnenburg, W. J. G. M., Baerselman, R., De Groot, A., Jager, T., Leenders, D., Posthuma, L., & Van Veen, R. (2000). Quantification of metal bioavailability for lettuce (*Lactuca sativa* L.) in field soils. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 39, 420-430. <https://doi.org/10.1007/s002440010123>
- Pour Hashemi, M. (1997). *Study of quality and quantity afforested species in Chitgar forest park*. Thesis of Msc in forestry field, Natural recourse faculty. university of Tehran. [In Persian]
- Qin, G., Niu, Z., Yu, J., Li, Z., Ma, J., & Xiang, P. (2021). Soil heavy metal pollution and food safety in China: Effects, sources and removing technology. *Chemosphere*, 267, 129205. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129205>
- Qishlaqi, A., Moore, F., & Forghani, G. (2009). Characterization of metal pollution in soils under two landuse patterns in the Angouran region, NW Iran; a study based on multivariate data analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 172(1), 374-384. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.024>
- Renella, G., Adamo, P., Bianco, M. R., Landi, L., Violante, P., & Nannipieri, P. (2004). Availability and speciation of cadmium added to a calcareous soil under various managements. *European Journal of Soil Science*, 55(1), 123-133. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00586.x>
- Sheikhi Alman Abad, Z., Pirkharrati, H., & Mojarad, M. (2021). Health risk assessment of heavy metals in the soil of angouran mineral processing complex in iran. *Pollution*, 7(1), 241-256. <https://doi.org/10.22059/poll.2020.311068.912>
- Shparyk, Y. S., & Parpan, V. I. (2004). Heavy metal pollution and forest health in the Ukrainian Carpathians. *Environmental Pollution*, 130(1), 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2003.10.030>

- Singh, K. P., Mohan, D., Sinha, S., & Dalwani, R. (2004). Impact assessment of treated/untreated wastewater toxicants discharged by sewage treatment plants on health, agricultural, and environmental quality in the wastewater disposal area. *Chemosphere*, 55(2), 227-255. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.10.050>
- Tanhan, P., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P., & Chaiyarat, R. (2007). Uptake and accumulation of cadmium, lead and zinc by Siam weed [*Chromolaena odorata* (L.) King & Robinson]. *Chemosphere*, 68(2), 323-329. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.12.064>
- Tao, Q., Hou, D., Yang, X., & Li, T. (2016). Oxalate secretion from the root apex of *Sedum alfredii* contributes to hyperaccumulation of Cd. *Plant and Soil*, 398, 139-152. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2651-x>
- Tufa, M., Melese, A., & Tena, W. (2019). Effects of land use types on selected soil physical and chemical properties: The case of Kuyu District, Ethiopia. *Eurasian Journal of Soil Science*, 8(2), 94-109. <https://doi.org/10.18393/ejss.510744>
- Udo, E. J., Bohn, H. L., & Tucker, T. C. (1970). Zinc adsorption by calcareous soils. *Soil Science Society of America Journal*, 34(3), 405-407. <https://doi.org/10.2136/sssaj1970.03615995003400030018x>
- Wang, J. X., Xu, D. M., Fu, R. B., & Chen, J. P. (2021). Bioavailability assessment of heavy metals using various multi-element extractants in an indigenous zinc smelting contaminated site, southwestern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16), 8560. <https://doi.org/10.3390/ijerph18168560>
- Yang, S., Dong, Z., Zhu, B., Yan, X., Huang, J., Xie, X., ... & Ning, P. (2024). Feasibility and solidification mechanism study of self-sustaining smoldering remediation for copper and lead-contaminated soil. *Environmental Research*, 250, 118498. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118498>
- Younas, N., Fatima, I., Ahmad, I. A., & Ayyaz, M. K. (2023). Alleviation of zinc deficiency in plants and humans through an effective technique; biofortification: A detailed review. *ActaEcologica Sinica*, 43(3), 419-425. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2022.07.008>
- Zhang, T., Wang, P., Wang, M., Liu, J., Gong, L., & Xia, S. (2023). Spatial distribution, source identification, and risk assessment of heavy metals in riparian soils of the Tibetan plateau. *Environmental Research*, 237, 116977. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116977>
- Zhu, Q., Ji, J., Tang, X., Wang, C., & Sun, H. (2023). Bioavailability assessment of heavy metals and organic pollutants in water and soil using DGT: A review. *Applied Sciences*, 13(17), 9760. <https://doi.org/10.3390/app13179760>
- Zinn, Y. L., de Faria, J. A., de Araujo, M. A., & Skorupa, A. L. A. (2020). Soil parent material is the main control on heavy metal concentrations in tropical highlands of Brazil. *Catena*, 185, 104319. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104319>



Evaluation of the seismic potential of Herat Fault in the west of Afghanistan based on Seismotectonic Parameters and Seismic Moment rate

Amin Mohammadi^a, Saeed Zarei^{b*}

^a MSc. in Department of Geophysics, Faculty of Nano and Bio Science and Technology, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

^b Assistant Professor in Department of Geophysics, Faculty of Nano and Bio Science and Technology, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

Article Info

Article history

Received: 9 July 2024

Received in revised form:
2 December 2024

Accepted:
25 December 2024

Available online :
21 March 2025

Keywords:

Herat Fault, Fractal analysis of seismicity, Seismotectonics, Seismic moment rate, b-value, D-value, Western Afghanistan, Stress accumulation

Abstract

The western Herat Fault system is one of Afghanistan's most seismotectonically active regions, having experienced four Mw >6 earthquakes in 2023. Given the significance of this region and the occurrence of successive seismic events, this study investigated the seismotectonic dynamics of the area through seismicity parameters and fractal analysis. Here, changes in the seismicity rate were analyzed based on variations in the seismic parameter (b-value) and the fractal dimension of fracturing and seismicity (D-value) using available seismic data.

The study area was divided into nine primary zones, with each zone's parameters calculated. The largest fault fractal dimensions were identified in the southeastern, central, and northwestern zones, while the highest seismic fractal dimension was associated with the central and northwestern regions. The calculated b-values in the center of the study area, coinciding with the Herat Fault, indicate elevated stress accumulation, potentially signaling future large earthquakes.

The seismic moment rate, representing the rate of energy change released through seismic activity, was estimated at 1.18×10^{18} Nm/yr for the entire study area. Combined fractal analysis and seismic moment calculations suggest that the Zendej-Jan, Injil, Ghurian, and Kushan districts are potential candidates for future earthquakes. These results reinforce the interpretation that western Afghanistan, as an evolving deformation zone, remains highly susceptible to seismic events.

*Corresponding author: Dr. Saeed Zarei

E-mail address: szarei@pgu.ac.ir

How to cite this article: Mohammadi, A., & Zarei, S. (2025). Evaluation of Seismic Potential of the Herat Fault in West of Afghanistan Based on Seismotectonic Parameters and Seismic Moment rate. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), pp. 79-98, DOI:<https://doi.org/10.22067/geoh.2024.88810.1500>



©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 Alpine-Himalayan seismic belt passes through Afghanistan, making the country prone to frequent earthquakes that cause significant human and financial losses. The northeastern regions experience the highest rate of seismic activity. Recently, several earthquakes have occurred along the Herat Fault system, highlighting this region's seismic potential.

Fractal analysis is a statistical approach extensively used to analyze spatial variability (Turcotte, 1997; Dimiri, 2000). This research builds upon recent developments in seismic studies, including fractal analysis of earthquake distributions conducted in Turkey, Japan, and India (Nanjo & Nagahama, 2004; Singh et al., 2012), applying these methods to the Herat Fault system. The study estimates the b-value as an indicator of seismicity and the D-value as an indicator of earthquake and fault fractal dimensions using square-counting and least squares methods. The seismic moment rate is further estimated to study energy dissipation and tectonic mechanisms (Bridges & Gao, 2006; Pal, 2008). This represents one of the first comprehensive studies of seismic activity along the Herat Fault in Afghanistan.

Material and Methods

Seismic data from 2011 to 2024 were extracted from regional and global earthquake catalogs, including ISC, USGS, and historical earthquake reports. The data were refined using the Reasenberg spatial-temporal window in Zmap software to remove foreshocks and aftershocks. Earthquakes were plotted on fault and topographic layers in ArcGIS. Main fractures and faults were identified from USGS 1:500,000 geological maps and enhanced with remote sensing techniques using ETM+ and ASTER imagery in ENVI 5.6 and ER Mapper.

The b-value was calculated using the least squares method, where lower values indicate higher shear stress. Fractal dimensions were computed using the box-counting method and mapped using kriging in ArcGIS (D-value). Seismic moment rates in 36 subregions (30×30 km each) were estimated using instrumental and historical data, revealing stress concentrations on the Siyah Bobak and Herat faults.

Results and Discussion

The fractal dimension of fault zones **reveals** their geometry and complexity. **Higher** values indicate denser, more complex fault networks (Charchi et al., 2001). In this study, section 9 faults showed the highest fractal dimension, suggesting greater fault density and potentially higher seismic risk, particularly in southern and southeastern areas due to stress concentration.

Fractal analysis of earthquake distribution showed high fractal dimensions in central, northwest, and western subregions, indicating greater seismic clustering. However, these findings depend on catalog completeness, and Afghanistan's limited monitoring infrastructure necessitates reliance on corrected global databases.

The b-value (relative frequency of large vs. small earthquakes) is inversely proportional to stress. Values <1 , as found along the Herat and Siyah Bobak faults, indicate higher shear stress and greater likelihood of large earthquakes (Scholz, 1968; Wyss, 1973). The D-value/b-value ratio suggests areas with low b-values and high D-values are more prone to significant seismic activity. High seismic moment rates around the Herat Fault correlate with 2023 seismic events, indicating blind faults and ongoing seismic potential (Johnston, 1996; Hanks, 1979; Kanamori, 1977).

Conclusions

The study reveals active deformation in Herat resulting from Indian-Eurasian plate movement, releasing substantial seismic energy. Zendej-Jan, Injil, Ghurian, and Kushan represent high-risk areas, with the northwestern region showing particularly high seismicity. These findings underscore the need for improved fault mapping and infrastructure development.

Acknowledgment

The authors thank Persian Gulf University for their support and research environment. Special gratitude to Dr. Shabir Ashkpoor Motlagh and Dr. Sayyed Reza Mansouri for their valuable suggestions and article review.



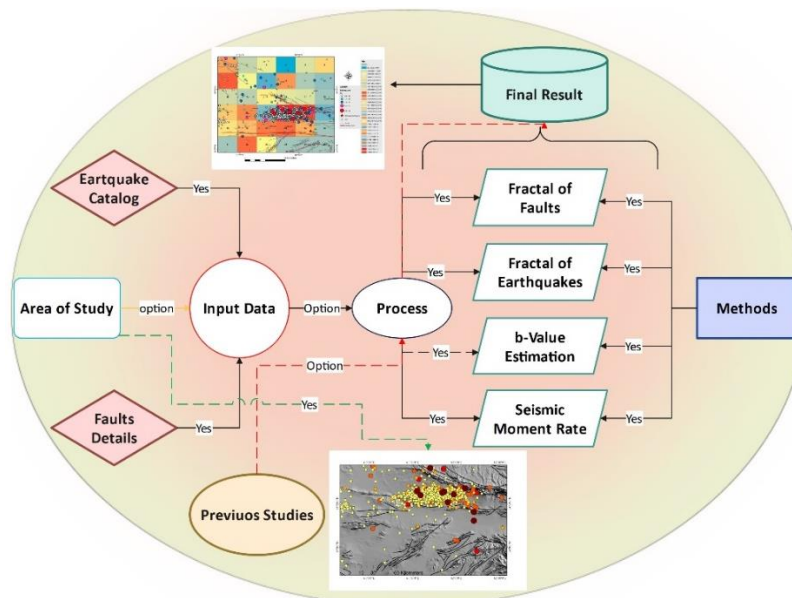
ارزیابی توان لرزه‌خیزی گسل هرات در غرب افغانستان بر پایه فراسنج‌های لرزه‌زمین‌ساختی و نرخ گشتاور لرزه‌ای

امین محمدی^۱، سعید زارعی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه ژئوفیزیک، دانشکده علوم و فناوری نانو و زیستی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران
^۲ استادیار گروه ژئوفیزیک، دانشکده علوم و فناوری نانو و زیستی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله	سیستم گسلی هرات غربی یکی از پهنه‌های فعال لرزه‌زمین‌ساختی افغانستان می‌باشد که در سال ۲۰۲۳ چهار زمین‌لرزه با $M_w > 6$ را تجربه نموده است. نظر به اهمیت این منطقه و رخداد لرزه‌ای متوالی، در این پژوهش پویایی لرزه‌زمین‌ساختی منطقه بر اساس فراسنج‌های لرزه‌خیزی و تحلیل فرکتالی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، تغییرات نرخ لرزه‌خیزی منطقه بر پایه تغییرات فراسنج لرزه‌خیزی (b-value) و بعد فرکتال شکستگی و لرزه‌خیزی (D-value) با استفاده از داده‌های لرزه‌ای موجود بررسی و تحلیل شده است. در یک تقسیم‌بندی منطقه مورد مطالعه به ۹ پهنه اولیه تقسیم شده و در هر پهنه فراسنج‌های لازم محاسبه شده است. بزرگترین ابعاد فرکتالی گسل محاسبه شده مربوط به پهنه‌های جنوب شرقی، مرکزی و شمال غربی است و بیشترین مقدار بعد فرکتالی لرزه‌خیزی مربوط به مناطق مرکزی و شمال غربی می‌باشد. مقادیر محاسبه شده برای پارامتر b در مرکز محدوده مطالعاتی و منطبق بر گسل هرات نشان‌دهنده افزایش تنش در این ناحیه بوده که ممکن است هشدار برای وقوع یک زمین‌لرزه بزرگ در آینده باشد. نرخ گشتاور لرزه‌ای نشان‌دهنده نرخ تغییر در انرژی سطح زمین است که به تغییرات لرزه‌ای تبدیل می‌شود. مقدار نرخ گشتاور لرزه‌ای برای کل منطقه مطالعاتی $1/18 \times 10^{18} \text{ Nmyr}^{-1}$ برآورد شده است. با توجه به مجموع تحلیل‌های فرکتالی و محاسبه گشتاورهای لرزه‌ای منطقه، مناطق زنده‌جان، انجیل، غوریان و کوشان می‌توانند به عنوان کاندیدای زلزله‌های بعدی معرفی شوند. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده این دیدگاه را تقویت می‌کند که غرب افغانستان به عنوان پهنه‌ای دگرشکلی در حال تکامل، مستعد رخدادهای لرزه‌ای بیشتری است.
کلمات کلیدی:	
گسل هرات	
تحلیل فرکتالی لرزه‌خیزی	
زمین‌لرزه‌شناسی ساختمانی	
نرخ گشتاور لرزه‌ای	
مقدار b	
مقدار D	
غرب افغانستان	
انباشت تنش	

چکیده تصویری



مقدمه

افغانستان در مسیر کمربند لرزه‌خیز آلپ-هیمالیا قرار دارد و به همین دلیل، تاریخچه‌ای طولانی از وقوع زمین‌لرزه‌های کوچک و بزرگ را داراست که گاه موجب فجایع انسانی و مالی فراوانی شده است. مناطق شمال‌شرقی افغانستان، شامل ایبک، پل‌خمري، تالقان و فیض‌آباد، به عنوان زلزله‌خیزترین نواحی کشور شناخته می‌شوند. هم‌چنین، زلزله‌های اخیر در هرات، که بر روی سامانه گسلی هرات واقع شدند، نشان می‌دهند که این منطقه نیز به عنوان یکی از نواحی مستعد لرزه‌خیزی محسوب می‌گردد.

تحلیل فرکتالی یکی از روش‌های رایج برای بررسی نحوه توزیع و اندازه متغیرها در فضاهاست (Turcotte, 1997; Dimiri, 2000). به کمک این روش آماری، سیستم گسلی هرات در غرب افغانستان مورد بررسی قرار گرفته است. در سال‌های اخیر، مطالعات لرزه‌شناسی مبتنی بر برآورد آماری ویژگی‌های فرکتالی زمین‌لرزه‌ها و گسل‌های فعال در بسیاری از مناطق جهان از جمله ترکیه، ژاپن و هند توسعه چشم‌گیری داشته است (Nanjo & Nagahama, 2004; Singh et al., 2012). در حالت نرمال، این فراسنج به مقدار ۱ نزدیک است، اما معمولاً ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی مناطق مختلف باعث انحراف از این مقدار می‌شود (Bridges & Gao, 2006; Pal, 2008).

نرخ گشتاور لرزه‌ای به عنوان یک نماینده از پتانسیل لرزه‌خیزی یک منطقه و نرخ تغییرات انرژی سطح پوسته برای تبدیل به تغییرات لرزه‌ای شناخته می‌شود. لرزه‌شناسان برای سنجش میزان انرژی آزاد شده از یک

زمین لرزه از گشتاور لرزه‌ای استفاده می‌کنند. گشتاور لرزه‌ای بهترین کمیت برای بررسی تأثیر زلزله در تغییرات زمین‌ساختی است، چرا که بیانگر انرژی آزاد شده توسط زمین لرزه می‌باشد.

پژوهش‌های متعددی جهت برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی و شناسایی چشمه‌های لرزه‌زا در بخش‌های مختلف ایران و جهان انجام شده است (Öncel & Wilson, 2001; Tavakoli Zadeh, Rahimi & Ghaemi, 2016). یاداو و همکاران (Yadav, Gahalaut, Chopra & Shan, 2012) نشان دادند که مقدار بُعد فرکتالی برای زلزله‌های نقطه‌ای در مناطق فروانش برابر با ۱ است و برای سطوح شکستگی صفحه‌ای مقادیر نزدیک به ۲ و شکستگی در حجم پوسته مقادیر نزدیک به ۳ را نشان می‌دهد. فدیمی و همکاران (Fadami, Zarei & Ashkpoor Motlagh, 2021) با استفاده از تحلیل فرکتالی و پارامترهای لرزه‌ای، ناهمسانی لرزه‌ای در پهنه خوزستان را بدست آوردند و نسبت بین b -Value و D -value را در این منطقه محاسبه کرده و تنشگاه‌ها را شناسایی کردند. رومینا و همکاران (Roumina, Zarei, Mansouri & Azadijou, 2023) نیز توزیع لرزه‌خیزی در جنوب زاگرس را با استفاده از همبستگی آماری بین b -value و بعد فرکتالی لرزه‌خیزی بررسی کرده و مناطق پرخطر در آینده را شناسایی کردند. زارعی و همکاران (Zarei, Khatib, Zare & Moussavi, 2020) برای شمال لوت و رشیدی و همکاران (Rashidi, Khatib, Mosavi & Jamor, 2017) به بررسی لرزه‌خیزی جنوب باختری لوت به کمک نرخ گشتاورها پرداختند. پان و همکاران (Pan, Yun & Shao, 2020) به تجزیه و تحلیل ژئودتیک و لرزه‌ای شمال شرقی تبت پرداختند. در این پژوهش، ابتدا منطقه به ۹ پهنه اصلی تقسیم شده و مقادیر D -value به روش مربع شمار و b -value به روش حداقل مربعات محاسبه شده است. سپس نسبت بین این دو پارامتر نیز برآورد گردیده است. برای هر یک از این پهنه‌ها، مقدار بعد فرکتالی لرزه‌خیزی و شکستگی محاسبه شده و با استفاده از روش کریجینگ^۱ در نرم‌افزار ArcGIS 10.7.1 پهنه‌بندی صورت گرفته است. سپس مقدار انرژی آزاد شده در فعالیت‌های لرزه‌ای با استفاده از برآورد نرخ گشتاور لرزه‌ای برای ۳۶ پهنه تهیه شده و پویایی لرزه‌زمین‌ساختی منطقه تحلیل شده است. این تحقیق جزء اولین مطالعات لرزه‌زمین‌ساختی در منطقه هرات افغانستان است.

مواد و روش‌ها

زمین شناسی منطقه مطالعاتی

افغانستان در کمربند کوهزایی فعال آلپ-همالیا قرار دارد. این کمربند نتیجه‌ی هم‌گرایی صفحات هند و اوراسیا از اواخر پالئوژن تا به امروز است (Ambraseys & Melville, 1982). این منطقه شاهد وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ و کم‌عمق است، هرچند برخی از زمین‌لرزه‌های عمیق نیز با مکانیزم فروانشی در زون پامیر-هندوکش رخ می‌دهند (Abdullah, 1993). افغانستان از نظر تکتونیکی دارای ساختارهای پیچیده و پتانسیل بالای لرزه‌خیزی است (شکل ۱-الف). افغانستان از زون‌های تکتونیکی مجزایی تشکیل شده که هر

1 Kriging

کدام ویژگی‌های منحصر به فردی دارند (Siehl, 2017). در شکل ۱-ب، مرزهای این زون‌ها عمدتاً توسط گسل‌ها مشخص شده‌اند.

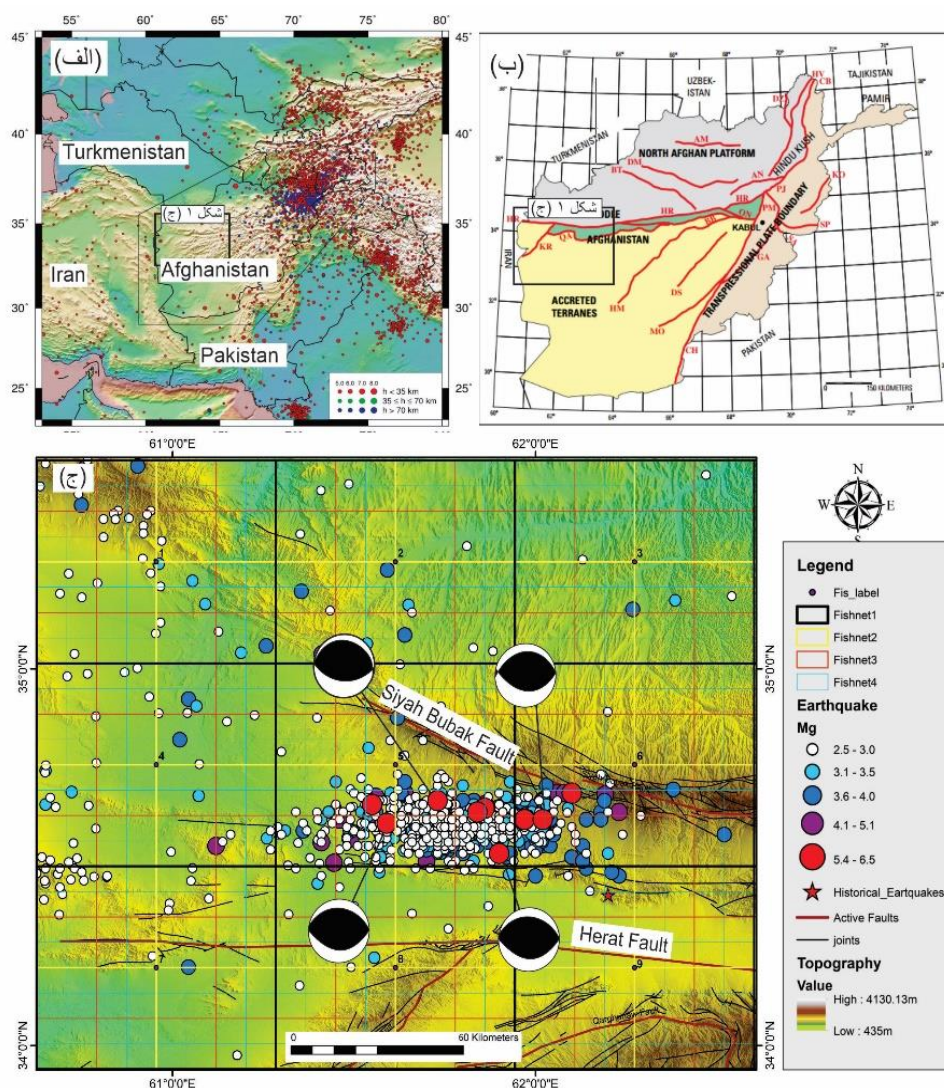
منطقه مورد مطالعه در پهنه تکتونیکی گسل هرات در غرب افغانستان قرار دارد (شکل ۱-ج) که تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی فعال است. این منطقه شامل توالی‌های سنگی متنوعی از سنگ‌های رسوبی، آذرین و دگرگونی است که در اثر فعالیت‌های گسلی مانند گسل هرات و گسل‌های فرعی نظیر قرغنه، کاج و سیاه‌بوبک دچار تغییرات ساختاری شده‌اند. گسل هرات که با روند شرقی-غربی امتداد دارد، ساختار زمین‌شناسی منطقه را به دو بخش تقسیم کرده و با ایجاد شکستگی‌ها و جابه‌جایی‌های لایه‌ها، تغییرات عمده‌ای در توپوگرافی و بستر رودخانه‌ها ایجاد کرده است. این منطقه مستعد زمین‌لرزه‌های مخرب است و این لرزه‌خیزی تأثیرات قابل‌توجهی بر زمین‌شناسی و زندگی ساکنان منطقه دارد.

گسل‌های فعال منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در مختصات ۳۴ تا ۳۵.۵ درجه شمالی و ۶۱ تا ۶۲.۵ درجه شرقی قرار دارد و شامل بخش غربی سیستم گسل هرات، گسل سیاه‌بوبک در شمال و گسل قرغنه در جنوب است. گسل هرات یک گسل امتدادلغز راست‌گرد است که از شرق افغانستان تا غرب امتداد دارد و با نرخ لغزش درازمدت حدود ۳ میلی‌متر در سال از حدود ۲ میلیون سال پیش فعال بوده است (Shnizai, 2020) (شکل ۱). این گسل در دوره اولیگوسن-میوسن دوباره فعال شد و شکستگی‌های جنوبی مرتبط با آن در دوره ترشیری به صورت امتدادلغز بازفعال شدند (Treloar & Izatt, 1993). گسل هرات بیشتر به عنوان یک سیستم گسلی با شاخه‌های فرعی متعدد در غرب افغانستان شناخته می‌شود. گسل کاج، یکی از این گسل‌های فرعی، با روند شمال شرقی-جنوب غربی در جنوب گسل هرات و با طول حدود ۱۳۰ کیلومتر قرار دارد. همچنین، گسل قرغنه به صورت یک گسل امتدادلغز راست‌گرد از شرق به غرب امتداد دارد (Abdullah, Chmyriov & Dronov, 2008). گسل سیاه‌بوبک با طول ۲۰ کیلومتر در شمال غربی هرات و نزدیک شهرستان سیاه‌بوبک واقع شده و فعالیت لرزه‌ای آن می‌تواند اثرات جدی بر جمعیت محلی داشته باشد (شکل ۱-ج).

زلزله‌های تاریخی هرات

جدول ۱ زمین‌لرزه‌های تاریخی سیستم گسلی هرات را نشان می‌دهد. از تاریخ ۷ اکتبر ۲۰۲۳، رخداد‌های زلزله پی در پی با بزرگی قابل توجه، ناحیه غرب افغانستان به‌ویژه منطقه هرات را تحت تأثیر قرار داده است. براساس گزارش‌های مرکز لرزه‌نگاری^۱ IRSC، در بازه زمانی ۷ تا ۱۵ اکتبر ۲۰۲۳، پنج زلزله با بزرگای ۶.۳ تا ۶.۵ در این منطقه به وقوع پیوست.



شکل ۱- الف) نقشه توپوگرافی افغانستان و کشورهای همسایه به همراه زمین لرزه‌های اصلی. ب) نقشه لرزه- زمین ساخت افغانستان: شمال افغانستان به رنگ خاکستری، افغانستان مرکزی به رنگ سبز؛ سرزمین‌های مرتفع به رنگ زرد و رنگ قهوه‌ای مرزهای ترافشارشی چپگرد بین صفحات هند و اوراسیا. ج) نقشه لرزه زمین ساخت منطقه مطالعاتی که در آن گسل‌های اصلی و فعال منطقه از جمله گسل‌های هرات، کاج، قرغنه و سیاه‌بویک نشان داده شده است. گسل هرات در مرکز نقشه با روند شرقی-غربی نشان داده شده است.

Fig.1. a) Topographic map of Afghanistan and neighboring countries along with major earthquakes. b) Seismotectonic map of Afghanistan: northern Afghanistan is shown in gray, central Afghanistan in green, highlands in yellow, and the transpressional left-lateral boundaries between the Indian and Eurasian plates are marked in brown. c) Seismotectonic map of the study area, highlighting the major and active faults in the region, including the Herat, Kaj, Qarghanaw, and Siyah Bubak faults. The Herat Fault is displayed in the center of the map with an east-west trend.

جدول ۱- رویداد های تاریخی منطقه مورد مطالعه با بزرگای بالاتر از ۴

Table 1- Historical events in the study area with magnitudes greater than 4

زمان رخداد Time (UTC)	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	عمق (کیلومتر) Depth (Km)	بزرگا Magnitude (Ms)	منطقه Region
849	34.3	62.2	15	5.6	Herat
1102-02-28	34.126	63.219	179.2	4.5	Herat
1364-02-19	34.89	61.852	10	4.6	Herat
1908-06-26	34.772	61.571	10	4.5	Herat
1931-09-10	34.585	61.997	33	4.5	Herat
1978-05-07	34.585	61.997	33	4.5	Herat
1982-10-17	33.951	62.233	33	4.6	Herat
1986-12-10	33.466	61.905	33	4.4	Herat
1990-06-11	34.126	63.219	179.2	4.5	Herat

روش انجام پژوهش

داده‌های لرزه‌ای دستگاهی از کاتالوگ لرزه‌خیزی آسیای میانه، سایت‌های USGS، ISC و موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران از سال ۲۰۱۱-۲۰۲۴ و زمین‌لرزه‌های تاریخی منطقه مورد مطالعه از گزارش‌های موجود جمع‌آوری شده است. بعد از تصحیحات لازم و حذف پس‌لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌ها با پنجره مکانی-زمانی ریزنبرگ^۱ در نرم افزار Zmap، در نهایت زلزله‌ها استخراج شده و در نرم افزار ArcGIS بر روی لایه‌های گسل و توپوگرافی پلات شده است. شکستگی‌ها و گسل‌های اصلی منطقه را از نقشه‌های زمین‌شناسی تهیه شده با مقیاس (۱:۵۰۰۰۰۰) توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا شناسایی و بارزسازی خطواره‌ها را با استفاده مطالعات دورسنجی، فیلترگذاری تصاویر ETM 8 و ASTER 15m در نرم‌افزارهای ENVI 5.6 و ER mapper آماده و در نرم افزار ArcGIS بارگذاری شده است.

b-value منطقه مورد مطالعه با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و به روش حداقل مربعات محاسبه شده است. روش‌های بیشترین احتمال و حداقل مربعات روش‌های برای محاسبه مقدار فراسنج b هستند. روش حداقل مربعات وزن‌دار با برازش خطی بر منحنی توزیع بزرگی-فراوانی منطبق می‌شود و شیب این خط به عنوان b-value لحاظ می‌گردد. مناطق با مقدار b-value کوچک‌تر معمولاً تنش برشی بیشتری را تجربه کرده‌اند (Bayrak & Öztürk, 2008). در واقع مناطق دارای مقدار کمتر b دارای احتمال گسیختگی بیشتر و وقوع زمین لرزه بزرگتری هستند.

فرکتال لرزه‌خیزی و شکستگی‌ها (D-value) با استفاده از روش مربع شمار^۲ محاسبه و با استفاده از روش کریجینگ در افزونه زمین‌آمار نرم‌افزار ArcGIS پهنه‌بندی شده است. کل محدوده مطالعاتی را به شبکه‌ای از پهنه‌های اصلی ۶۰ کیلومتر در نرم افزار ArcGIS و MATLAB طراحی شده و سپس تا چهار مرحله، هربار

1 Reasenberg Declustering

2 Box-counting

هر مربع به چهار مربع کوچکتر تقسیم شده است (شکل ۱-ج). فرکتال برای توصیف یک شکل هندسی بکار می‌رود، که با تفکیک آن به اشکال هندسی کوچک‌تر، یک هندسه همانند حفظ می‌شوند. تحلیل الگوی فرکتالی عوارض و ساختارهای زمین‌شناسی می‌تواند برای تعیین فعالیت زمین‌ساختی استفاده گردد (Cheng, Agterberg & Ballantyne, 1994). براساس تورکات (Turcotte, 1997)، مجموعه فرکتال به صورت زیر (رابطه ۱) تعریف می‌شود:

$$N_i = \frac{C}{r_i^D} \quad (1)$$

که در این رابطه N_i ، r_i ، C به ترتیب تعداد پدیده‌ها، بعد خطی ویژه و ثابت رابطه و D بعد فرکتال است. این رابطه را (رابطه ۲) می‌توان به صورت دیگر نیز بیان کرد:

$$D = \frac{\log\left(\frac{N_i + 1}{N_i}\right)}{\log\left(\frac{r_i}{r_i + 1}\right)} \quad (2)$$

که در این معادله D بعد فرکتال، N تعداد پدیده‌ها، r طول مربع در هر مرتبه و i مرتبه است. می‌توان شکل ساده‌تر از رابطه ۲ به صورت رابطه ۳ نوشت:

$$\log(N) = C + K \log\left(\frac{1}{S}\right) \quad (3)$$

در این رابطه N تعداد پدیده‌ها، S اندازه شبکه به کار گرفته شده، a ثابت رابطه و k بعد فرکتالی است. تحلیل‌ها بر اساس نمودار $\log - \log$ از تعداد مربع‌های حاوی ساختار N_n بر حسب عکس طول شبکه‌های ایجاد شده ($1/r_n$) صورت می‌گیرد. طبق رابطه ۴:

$$\log(N_n) = D \cdot \log\left(\frac{1}{r_n}\right) + c \quad (4)$$

در این رابطه D شیب خط برازش شده و نشان‌دهنده بعد فرکتالی می‌باشد که دامنه تغییرات این ضریب در روش مربع‌شمار و در یک سامانه دو بعدی می‌تواند عددی در بازه صفر تا ۲ مربوط به مناطق پویا از لحاظ لرزه‌خیزی باشد (Yadav et al., 2012). مقادیر D_c نزدیک به صفر می‌تواند مربوط به تراکم زمین‌لرزه‌ها در یک نقطه باشد، مقادیر نزدیک به یک می‌تواند مربوط به پراکندگی خطی زلزله‌ها در یک پهنه فرورائشی باشد و مقادیر نزدیک‌تر به دو نشان‌دهنده شکستگی صفحه‌ای باشد. در سامانه سه بعدی این مقدار می‌تواند تا ۳ نیز تغییر کند که مقادیر نزدیک‌تر به ۳ مرتبط به حجم پوسته توسط گسل‌های ایجاد شده در اثر زلزله‌های انباشته شده باشد (Tosi, Rubeis, Loreto & Pietronero, 2008).

نتایج و بحث

برآورد فرکتال گسلی

توزیع فرکتالی شکستگی‌ها یا بعد فرکتال در یک پهنه گسلی، نحوه فعالیت و گسترش گسل را نشان می‌دهد (Charchi, Khatib, Mozafarkhah & Barjasteh, 2001). گسل‌ها به‌عنوان پارامترهای مهم در مطالعات لرزه‌زمین‌ساختی مورد بررسی قرار می‌گیرند و تحلیل هندسه فرکتالی آن‌ها بر پایه خودهمسانی است. مقادیر

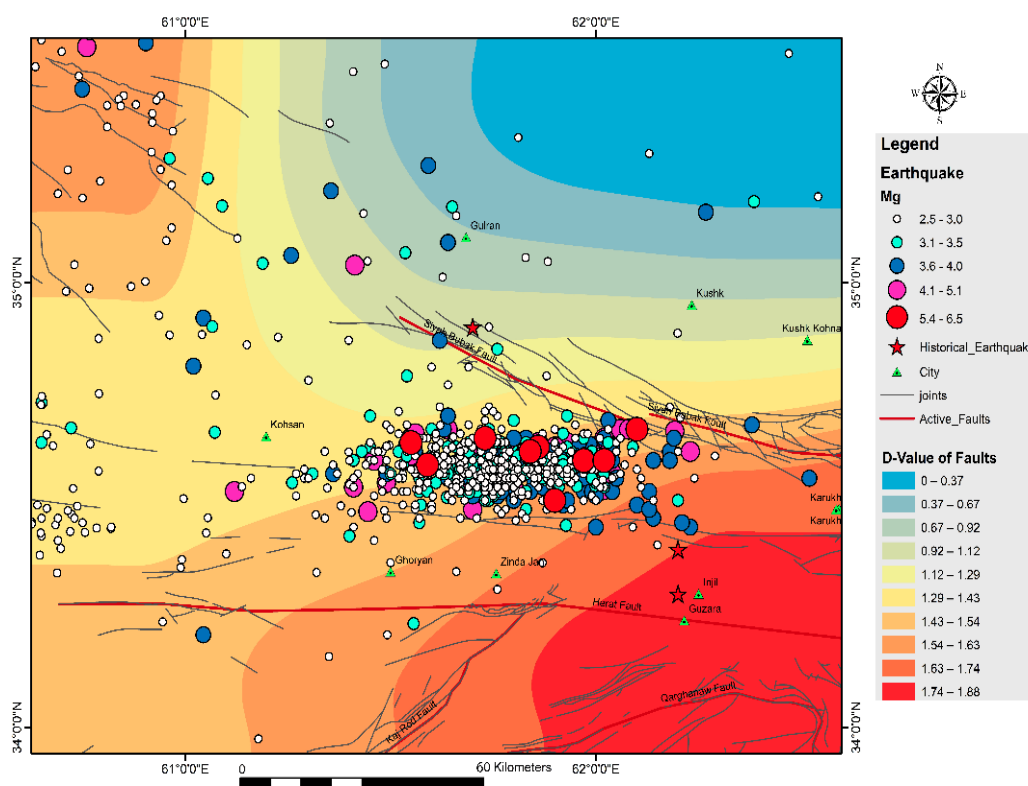
بزرگتر بعد فرکتالی نشان‌دهنده بی‌نظمی بیشتر هندسه گسل و تراکم بیشتر شکستگی‌ها در یک سطح رخمون است، که بیانگر پیچیدگی بیشتر هندسه گسل در مناطق با بعد فرکتالی بالاتر می‌باشد. توزیع فضایی گسل‌ها بر مقدار عددی بعد فرکتالی تاثیر می‌گذارد و شدت شکستگی‌ها معرف مقدار بعد فرکتال سامانه گسلی است. هر پهنه گسلی به‌صورت جداگانه ارزیابی شده و برای هر یک بعد فرکتالی محاسبه شده است. جدول ۲ مقادیر بعد فرکتالی گسل در پهنه‌های ۹ گانه را نشان می‌دهد و شکل ۲ پهنه‌بندی آن‌ها را در محدوده مطالعاتی نشان می‌دهد. مقدار کم بعد فرکتالی در سیستم‌های گسلی نشان‌دهنده محدودیت گستره سطحی گسل و رسیدن آن به حداکثر دگرشکلی است.

جدول ۲- نتایج عددی ابعاد فرکتالی D-value در هر پهنه

Table 2- Numerical results of fractal dimensions (D-value) in each zone

D1 = 1.6274	D2 = 0.387	D3 = 0
D4 = 1.2943	D5 = 1.3262	D6 = 1.5686
D7 = 1.4925	D8 = 1.6585	D9 = 1.8844

در این مطالعه، پهنه ۹ دارای بیشترین مقدار بعد فرکتالی بوده و پس از آن بخش‌های ۸، ۱، ۶ و ۷ قرار دارند. ابعاد فرکتالی به سمت جنوب و جنوب شرقی افزایش یافته که ممکن است به دلیل تراکم میدان تنش و افزایش پتانسیل لرزه‌زایی در این مناطق باشد.



شکل ۲- نقشه پهنه‌بندی بعد فرکتالی گسل‌ها، رنگ‌های گرم (قرمز) مناطق با ابعاد فرکتالی بالاتر و رنگ-های سرد (آبی) مناطق با ابعاد فرکتالی پایین‌تر را نشان می‌دهند.

Fig.2. The fractal dimension zoning map of faults. Warm colors (red) indicate areas with higher fractal dimensions, while cool colors (blue) represent areas with lower fractal dimensions.

برآورد فرکتالی زمین‌لرزه‌ها

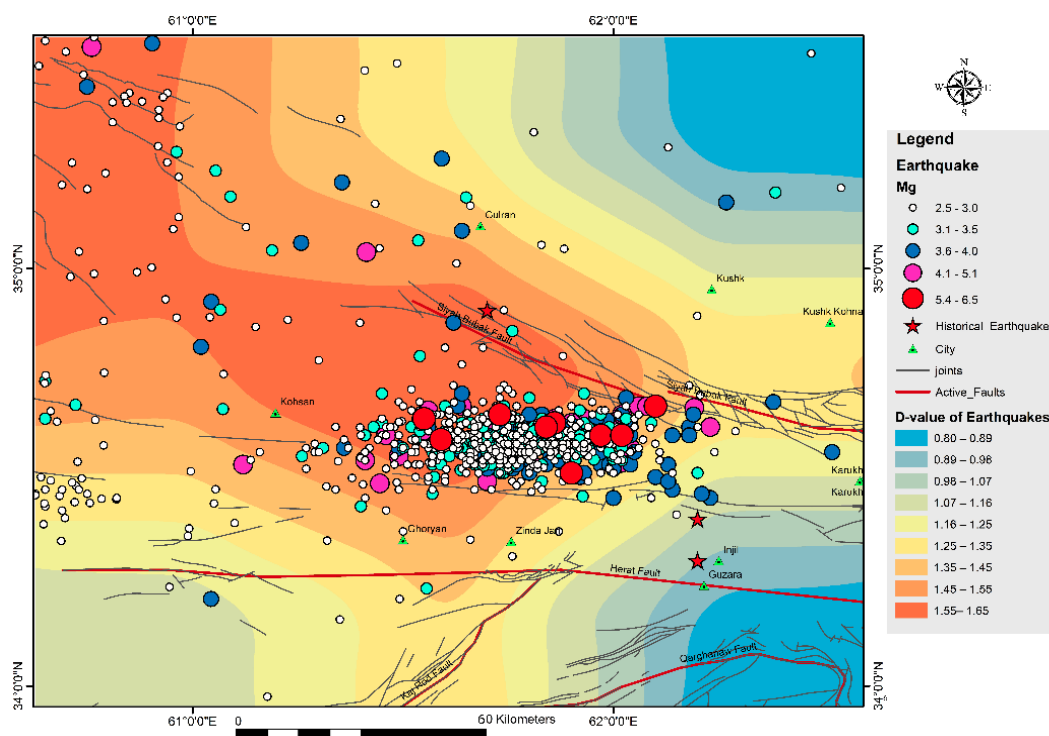
برای بررسی ارتباط گسل‌های منطقه با زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه مطالعاتی، پس از محاسبه بعد فرکتالی سیستم‌های گسلی در منطقه مورد مطالعه، فرکتال زمین‌لرزه‌ها نیز محاسبه شد. نتایج در جدول ۳ مقدار فرکتال هر مربع را نشان می‌دهد، و در شکل ۳، پهنه‌بندی منطقه بر اساس این مقادیر ارائه شده است. با توجه به اینکه افزایش بعد فرکتالی در منطقه نشانه‌ای از فراوانی بیشتر زمین‌لرزه‌ها است، می‌توان نتیجه گرفت که بخش‌های مرکزی، شمال غرب و غرب منطقه شامل زیرپهنه‌های ۵، ۴، ۱ و ۶ دارای تراکم بالاتری از رخداد‌های لرزه‌ای نسبت به سایر نواحی هستند (شکل ۳).

جدول ۳- نتایج عددی ابعاد فرکتالی زلزله‌ها D-value در هر پهنه

Table 3- Numerical results of earthquake fractal dimensions (D-value) in each zone

D1 = 1.5561	D2 = 1.2561	D3 = 0.8077
D4 = 1.5561	D5 = 1.7557	D6 = 1.4381
D7 = 1.0966	D8 = 1.3415	D9 = 0.834

بالا بودن بعد فرکتالی شکستگی و پایین بودن بعد فرکتالی لرزه‌خیزی در نواحی جنوبی و جنوب شرقی نشان می‌دهد که گسل‌های این مناطق هنوز انرژی ذخیره‌شده خود را آزاد نکرده‌اند و پتانسیل لرزه‌زایی بالایی دارند.



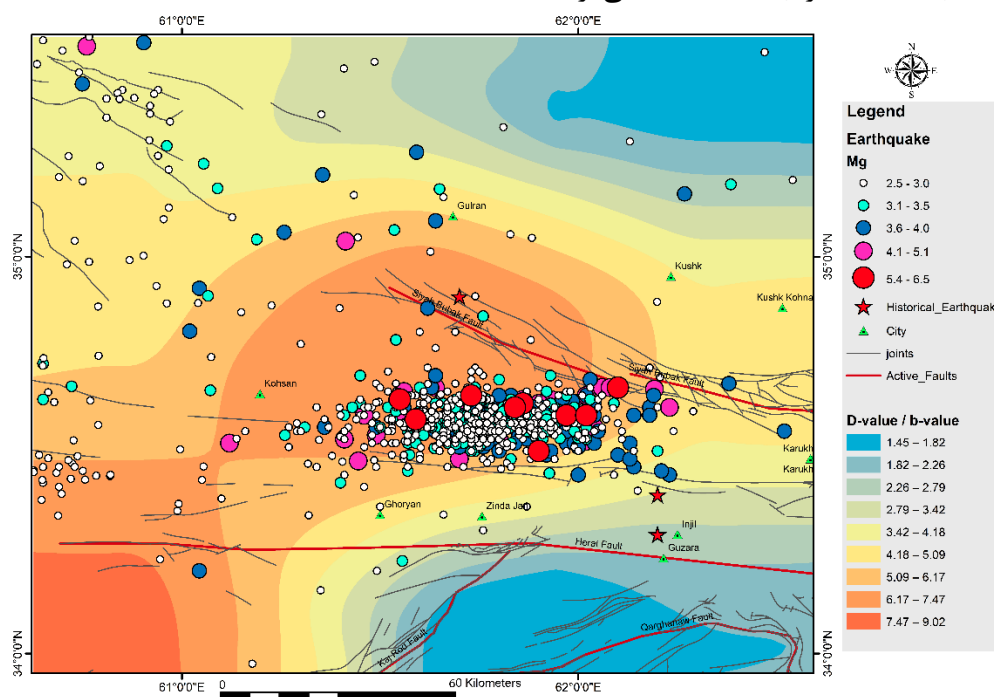
شکل ۳- نقشه پهنه بندی بعد فرکتالی رومرکز زلزله‌ها

Fig.3. The fractal dimension zoning map of earthquake epicenters

برآورد b-value

مقدار b، علاوه بر نشان دادن رابطه نسبی تعداد زمین‌لرزه‌های بزرگ و کوچک در یک ناحیه، به شرایط تنش آن نیز وابسته است. رابطه‌ای معکوس بین b-value و تنش انحرافی وجود دارد، به طوری که مقدار b می‌تواند به عنوان تنش سنج عمل کند. در شرایط معمول زمین‌ساختی، مقدار b نزدیک به ۱ است، اما وجود شکستگی‌های مختلف و گرادیان حرارتی می‌تواند آن را افزایش دهد، در حالی که تنش فشارشی و مؤثر بالاتر موجب کاهش b می‌شود (Scholz, 1968; Wyss, 1973). مناطق با b-value کمتر اغلب در معرض تنش برشی بیشتری قرار

دارند و در پی زمین‌لرزه‌های اصلی، با احتمال بالاتر وقوع شکستگی و زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر همراهند. در شکل ۴ نقشه پهنه‌بندی b -value برای منطقه مطالعاتی ارائه شده است.



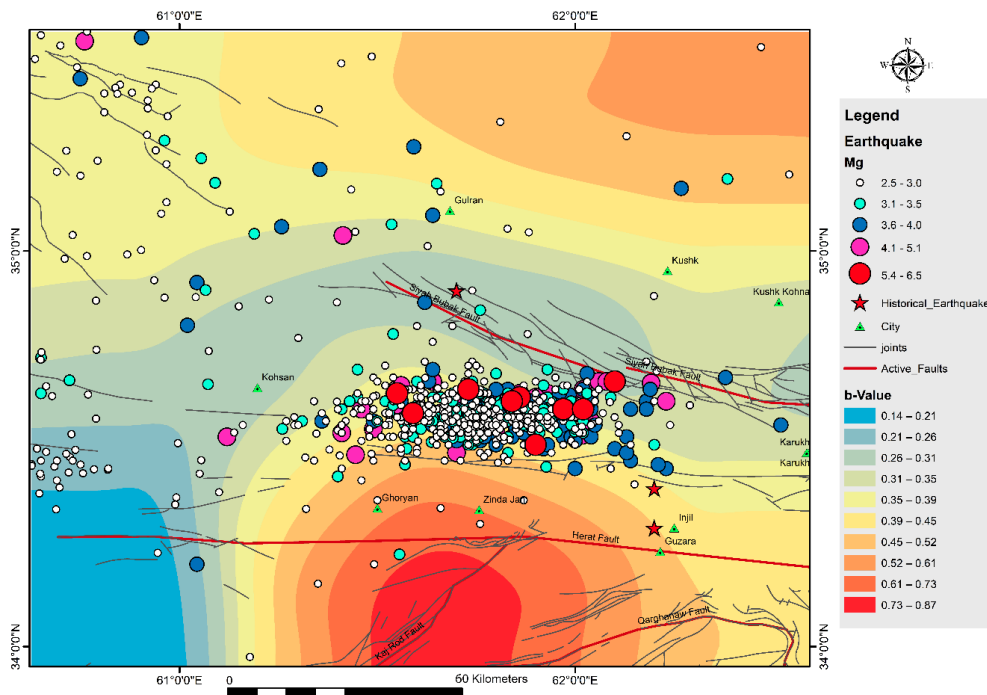
شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی تغییرات b -value. نقشه شامل ۹ پهنه می‌باشد که مقدار بعد فرکتال در هر پهنه محاسبه و سپس به روش کریجینگ در GIS پهنه‌بندی شده است.

Fig.4. Zoning map of b -value variations, and. The map consists of 9 zones where the fractal dimension value in each zone is calculated and then zoned using the Kriging method in GIS.

برآورد نسبت D -value/ b -value

همبستگی مثبت یا منفی بین b -value و D -value با الگوهای مختلف شکست در مجموعه‌های فعال گسلی مرتبط است. مقدار بالای D نشان‌دهنده شبکه‌های گسلی متراکم‌تر و پیچیده‌تر است، که به دلیل تراکم بالای گسلش در این مناطق رخ می‌دهد (Oncel & Wilson, 2002). مناطقی با مقدار b کمتر معمولاً تنش برشی بیشتری را پس از زلزله‌های اصلی تجربه می‌کنند، در حالی که مقادیر بالاتر b به مناطق دارای لغزش اشاره دارند (Bayrak & Öztürk, 2004). ارتباط بین D و b ، اطلاعات ارزشمندی درباره لرزه‌زمین‌ساخت منطقه ارائه می‌دهد (Bayrak & Bayrak, 2012). به طور کلی، مقادیر کم b و مقادیر زیاد D نشان‌دهنده تنش‌گاه‌ها و مناطقی با خطر لرزه‌ای بالا هستند، در حالی که مقادیر بالای b و مقادیر کم D بیانگر مناطق با خزش گسل است. در شکل ۵، نقشه پهنه‌بندی نسبت D به b نشان داده شده است. این نقشه نشان می‌دهد که بخش‌های

شرقی و جنوبی منطقه دارای مقادیر کمتری از این نسبت بوده، در حالی که بخش‌های مرکزی، در امتداد گسل هرات و بخش‌های غربی، مقادیر بالاتری دارند.



شکل ۵- نقشه پهنه‌بندی شده بر اساس نسبت D-value / b-value

Fig.5. Zoning map based on the D-value / b-value ratio

برآورد نرخ گشتاور لرزه‌ای

نرخ گشتاور لرزه‌ای که نشان‌دهنده مولفه لرزه‌ای تغییر شکل‌ها است، با استفاده از روابط تجربی قابل محاسبه است. یکی از روش‌های رایج برای برآورد نرخ گشتاور لرزه‌ای، استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری زمین‌لرزه‌ها و کاتالوگ‌های زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی است. در این روش با توجه به روابط تجربی موجود بین بزرگای مختلف (M_W , M_S , m_b , M_L) و گشتاور لرزه‌ای اسکالر، می‌توان گشتاور لرزه‌ای را برای هر زمین‌لرزه محاسبه و سپس نرخ گشتاور لرزه‌ای را تعیین کرد. رابطه‌ای استفاده شده در این پژوهش عبارت است از:

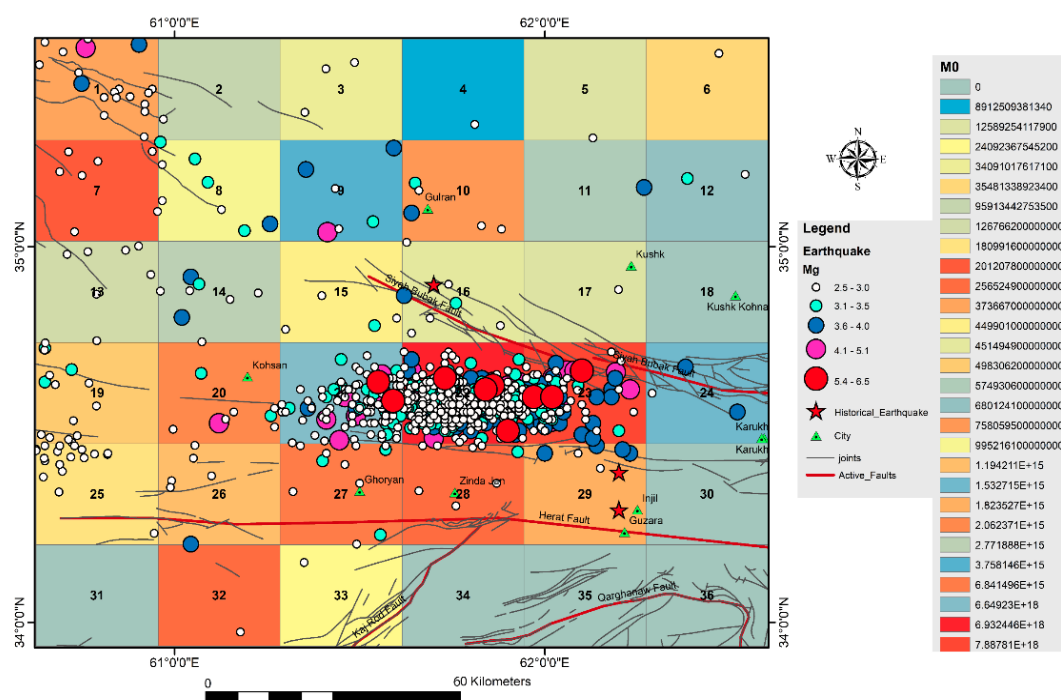
بر اساس رابطه M_W (Kanamori, 1977)

$$M_W = \frac{2}{3} \log(M_0 / Nm) - 6.0 \quad (5)$$

که برای روابط ۳ تا ۵ مقدار M_0 حسب نیوتون متر (N.m) می‌باشد.

جهت تبدیل گشتاور لرزه‌ای به نرخ گشتاور از دو روش میان‌گیری بر اساس سال‌های موجود و رسم نمودار گشتاور تجمعی در مقابل سال‌های موجود در کاتالوگ زمین‌لرزه‌ای و اندازه‌گیری شیب خط استفاده می‌شود. در این مرحله، منطقه مطالعاتی به ۳۶ پهنه با ابعاد حدودی ۳۰ کیلومتر در ۳۰ کیلومتر تقسیم شده و نرخ

گشتاور لرزه‌ای در هر پهنه محاسبه شده است (شکل ۶). بیشترین نرخ گشتاور لرزه‌ای مربوط به پهنه‌های ۲۲، ۲۳، و ۷ و پس از آن پهنه‌های ۲۰، ۲۷ و ۲۸ است که در حوالی گسل‌های سیاه بوبک و گسل اصلی هرات و در نزدیکی شهرهای زنده‌جان، انجیل، غوریان و بخش‌هایی از استان خراسان رضوی ایران واقع شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین انرژی آزاد شده در منطقه هرات مربوط به پهنه‌هایی است که زمین‌لرزه‌های با بزرگای بالای ۶ در سال ۲۰۲۳ در آن‌ها رخ دادند و نرخ گشتاور لرزه‌ای در این مناطق بالاتر است. کمترین نرخ گشتاور لرزه‌ای در مناطق مرزی با ترکمنستان و بخش‌های شرقی منطقه مطالعاتی مشاهده شده است. همچنین، مناطق با نرخ بالای گشتاور لرزه‌ای و فرکتال گسلی پایین می‌توانند نمایانگر وجود گسل‌های پنهان باشند؛ بنابراین تدقیق این گسل‌ها در این مناطق توصیه می‌شود.



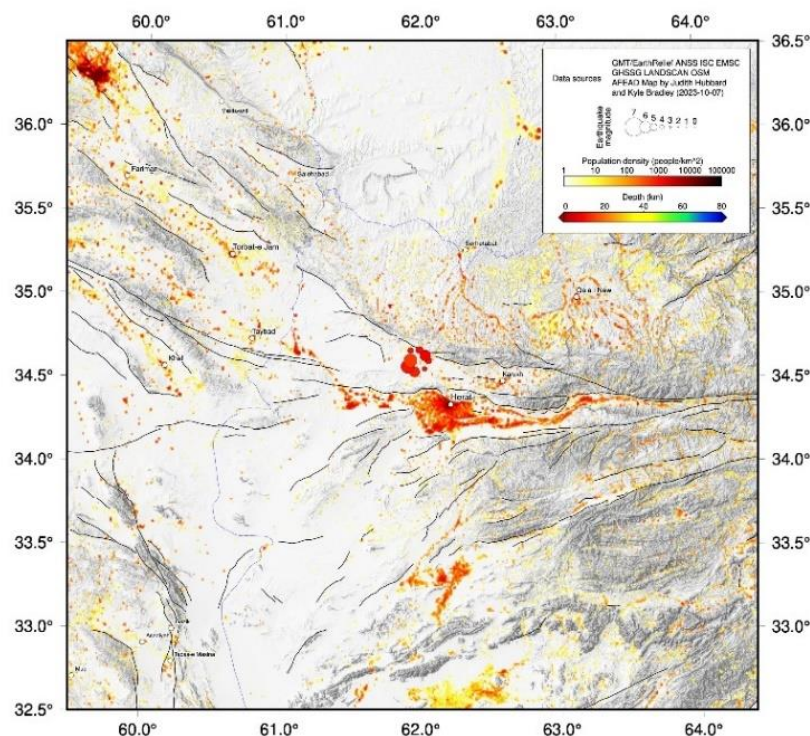
شکل ۶- برآورد نرخ گشتاور لرزه‌ای در شبکه‌بندی سلول‌ها برای پهنه گسلی هرات و مناطق اطراف. ابعاد هر سلول ۳۰×۳۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. رنگ‌های گرم‌تر نرخ بالاتر گشتاور لرزه‌ای و رنگ‌های سردتر نرخ پایین‌تر را نشان می‌دهند.

Fig.6. Estimation of seismic moment rate in the grid cells for the Herat fault zone and surrounding areas. Each cell is sized 30×30 kilometers. Warmer colors indicate higher seismic moment rates, while cooler colors represent lower rates.

مقدار گشتاور لرزه‌ای برآورد شده برای کل زمین لرزه‌های محدوده مطالعاتی معادل $2/25 \times 10^{19} \text{ Nm yr}^{-1}$ می‌باشد و مقدار نرخ آن براساس سال‌های موجود در کاتالوگ معادل $1/18 \times 10^{18} \text{ Nm yr}^{-1}$ که به روش میان‌گیری بر اساس سال‌های موجود در کاتالوگ محاسبه گردیده است. تفاوت در میزان رهایی انرژی در بخش‌های مختلف هرات می‌تواند به دلیل پیچیدگی‌های سنگ‌شناسی، وجود لایه‌های تبخیری، و هندسه گسل‌ها باشد.

تأثیرات اجتماعی- جغرافیایی زمین‌لرزه بر منطقه

نرخ گشتاور لرزه‌ای برآورد شده در کل منطقه مطالعاتی به افزایش تنش در این پهنه لرزه‌خیز اشاره دارد. این نرخ گشتاور قابل توجه نشان‌دهنده پتانسیل لرزه‌خیزی بالای منطقه است که می‌تواند با زمین‌لرزه‌های بزرگ و مخرب همراه باشد. اثرات اجتماعی و جغرافیایی این زمین‌لرزه‌ها در مناطق پرجمعیت و روستایی استان هرات به شکل خسارات گسترده به زیرساخت‌ها و آسیب‌پذیری بالای ساختمان‌های سنتی، خصوصاً در مناطقی مانند انجیل، زنده‌جان و کوشک، نمایان شده است (شکل ۷).



شکل ۷- نقشه پراکندگی و تراکم جمعیت در اطراف رومرکز زمین لرزه‌های ۲۰۲۳

Fig.7. Map of population distribution and density around the epicenters of the 2023 earthquakes, adapted from (Hubbard & Bradley, 2023).

نتیجه گیری

در مطالعه لرزه‌زمین‌ساخت هرات، پارامترهای لرزه‌ای مانند بعد فرکتالی، مقدار b و نرخ گشتاور لرزه‌ای محاسبه شده‌اند که نشان‌دهنده تغییر شکل‌های فعال ناشی از تنش‌های برخورد صفحات هند و اوراسیا است. این تغییرات به صورت دگرشکلی‌های داخلی و زمین‌لرزه‌ها ادامه یافته‌اند. با محاسبه گشتاورهای لرزه‌ای، میزان کل انرژی آزاد شده در منطقه مطالعاتی برابر $10^{18} \text{ Nm yr}^{-1} \times 1/18$ برآورد شده است. این تحلیل نشان می‌دهد که علاوه بر بخش‌های میانی منطقه، که شامل گسل اصلی هرات و شاخه‌های فرعی آن است، نواحی جنوب شرقی منطقه نیز به عنوان مناطقی با پتانسیل لرزه‌خیزی بالا در آینده شناسایی می‌شوند. این نواحی، جایی که سیستم گسلی هرات فشرده‌تر می‌شود، تحت تنش‌های بیشتری قرار دارند. از مجموع این تحلیل‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که خطر لرزه‌خیزی در مناطقی مانند زنده‌جان، انجیل، غوریان، و کوشان بالا است. همچنین، پهنه‌بندی مرکز سطحی زلزله‌های رخ داده در منطقه نشان‌دهنده فعالیت لرزه‌ای بالاتر در بخش‌های شمال غربی است. این یافته‌ها بر ضرورت تدقیق نقشه‌های گسلی و تقویت زیرساخت‌های مقاوم در برابر زلزله به‌ویژه در مناطق پرخطر تأکید می‌کنند.

سپاسگزاری

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از دانشگاه خلیج فارس برای حمایت‌های ویژه و فراهم‌آوری فضای مناسب پژوهش و همچنین از جناب دکتر شبیر اشکیور مطلق و جناب دکتر سید رضا منصوری برای ارائه پیشنهادات علمی و بازبینی مقاله اعلام می‌دارند.

References

- Abdullah, S. (1993). Seismic hazard assessment in the Islamic state of Afghanistan. The practice of earthquake hazard assessment, IASPEI/ESC Publication, McGuire RK, ed, 284. <https://www.researchgate.net/publication/316643937>
- Abdullah, S. H., Chmyriov, V. M., & Dronov, V. I. (2008). Geology and mineral resources of Afghanistan. <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/3723>
- Ambraseys, N. N., Melville, C. (1982). A seismic history of Persian earthquakes. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290110412>
- Bayrak, Y., & Bayrak, E. (2012). Regional variations and correlations of Gutenberg–Richter parameters and fractal dimension for the different seismogenic zones in Western Anatolia. Journal of Asian Earth Sciences, 58, 98-107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.06.018>
- Bayrak, Y., & Öztürk, S. (2004). Spatial and temporal variations of the aftershock sequence of the 1999 Izmit and Duzce earthquake. Earth Planets Space, 56, 933-944. <https://doi.org/10.1186/BF03351791>

- Bridges, D. L., & Gao, S. S. (2006). Spatial variation of seismic b-values beneath Makushin Volcano, Unalaska Island, Alaska. *Earth and Planetary Science Letters*, 245(1-2), 408-415. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.03.010>
- Charchi, A., Khatib, M. M., Mozafarkhah, M., & Barjasteh, A. (2011). Fractal analysis for determination of Tectonic activity in the north of Lali, NE Khuzestan. *Advanced Applied Geology*, 1(1), 37-47. [In Persian] https://aag.scu.ac.ir/article_11542.html?
- Cheng, Q., Agterberg, F. P., & Ballantyne, S. B. (1994). The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical exploration*, 51(2), 109-130. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90013-2)
- Dimiri, V. P. (2000). *Application of fractals in the earth sciences*. CRC Press, A Balkema Publishers.
- Fadami, M., Zarei, S., & Ashkpoor Motlagh, S. (2021). The Seismicity Dissimilarity Investigation of Khuzestan in the Southwest of Zagros using by Fractal Analysis. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 8(3), 1-15. [In Persian] <https://doi.org/10.48303/bese.2021.245995>
- Hubbard, J., & Bradley, K. (2023). Two magnitude 6.3 earthquakes strike northwestern Afghanistan. *Earthquake Insights*. <https://doi.org/10.62481/5776c220>
- Kanamori, H. (1977). Seismic and aseismic slip along subduction zones and their tectonic implications. *Island Arcs, Deep Sea Trenches and Back-Arc Basins*, 1, 163-174. <https://doi.org/10.1029/ME001p0163>
- Nanjo, K., & Nagahama, H. (2004). Fractal properties of spatial distributions of aftershocks and active faults. *Chaos, Solitons & Fractals*, 19(2), 387-397. [https://doi.org/10.1016/S0960-0779\(03\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0960-0779(03)00051-1)
- Öncel, A. O., & Wilson, T. (2004). Correlation of seismotectonic variables and GPS strain measurements in western Turkey. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B11). <https://doi.org/10.1029/2004JB003101>
- Oncel, A. O., & Wilson, T. H. (2002). Space-time correlations of seismotectonic parameters: Examples from Japan and from Turkey preceding the Izmit earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(1), 339-349. <https://doi.org/10.1785/0120000844>
- Pal, P. K. (2008). Geomorphological, Fractal Dimension and b-Value Mapping in Northeast India. *The Journal of Indian Geophysical Union*, 12, 41-54. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:73582101>
- Pan, Z., Yun, Z., & Shao, Z. (2020). Contemporary crustal deformation of Northeast Tibet from geodetic investigations and a comparison between the seismic and geodetic moment release rates. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 304, 106489. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106489>
- Rashidi, A., Khatib, M. M., Mosavi, S. M., & Jamor, Y. (2017). Estimation of the active faults, based on Seismic, geologic and geodetic moment rates in the South and West of Lut block. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 26(104), 211-222. [In Persian] <https://doi.org/10.22071/gsj.2017.50265>

- Roumina, A., Zarei, S., Mansouri, S. R., & Azadijou, O. (2023). Seismic distribution in the south of Zagros using the statistical correlation between b-Value and fractal dimension. *Iranian Journal of Geophysics*, 17(1), 89-107. [In Persian]
<https://doi.org/10.30499/ijg.2022.335123.1413>
- Scholz, C. H. (1968). The frequency-magnitude relation of micro fracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(1), 399-415.
<https://doi.org/10.1785/BSSA0580010399>
- Shnizai, Z. (2020). Mapping of active and presumed active faults in Afghanistan by interpretation of 1-arcsecond SRTM anaglyph images. *Journal of Seismology*, 24(6), 1131-1157.
<https://doi.org/10.1007/s10950-020-09933-4>
- Siehl, A. (2017). Structural setting and evolution of the Afghan orogenic segment—a review. *Geological Society, London, Special Publications*, 427(1), 57-88.
<https://doi.org/10.1144/SP427.8>
- Singh, A. P., Mishra, O. P., Kumar, D., Kumar, S., & Yadav, R. B. S. (2012). Spatial variation of the aftershock activity across the Kachchh Rift Basin and its seismotectonic implications. *Journal of Earth System Science*, 121, 439-451.
<https://doi.org/10.1007/s12040-012-0175-9>
- Tavakoli Zadeh, N., Rahimi, B., Ghaemi, F. (2016). The study of seismotectonics and asperities in Zagros through the b-value parameter. 34th National and the 2nd International Geosciences Congress.[In Persian]
- Tosi, P., De Rubeis, V., Loreto, V., & Pietronero, L. (2008). Space–time correlation of earthquakes. *Geophysical Journal International*, 173(3), 932-941.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03770.x>
- Treloar, P. J., & Izatt, C. N. (1993). Tectonics of the Himalayan collision between the Indian plate and the Afghan block: A synthesis. *Geological Society, London, Special Publications*, 74(1), 69-87. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1993.074.01.06>
- Turcotte, D. L. (1997). *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. New York: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174695>
- Wyss, M. (1973). Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution. *Geophysical Journal International*, 31(4), 341-359.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1973.tb06506.x>
- Yadav, R. B. S., Gahalaut, V. K., Chopra, S., & Shan, B. (2012). Tectonic implications and seismicity triggering during the 2008 Baluchistan, Pakistan earthquake sequence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 45, 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.10.003>
- Zarei, S., Khatib, M. M., Zare, M., & Moussavi, S. M. (2020). Estimation of the Seismicity Potential, Based on Geodetic, Seismic, and Geological Moment Rate in the Lut Block. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 7(1), 15-36. [In Persian]
https://www.bese.ir/article_240420.html



Vulnerability analysis of facilities against flood with emphasis on AHP Fuzzy method (case study: Khorramabad city)

Amir Rahimi^a, Mahin Nastaran^{b*}

^a Master of Urban Planning, Faculty of Architecture and Urban Planning, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran

^b Associate Professor, Department of Urban Planning, Faculty of Architecture and Urban Planning, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran.

Article Info

Abstract

Article history

Received: 6 August 2024

Received in revised form :
10 January 2025

Accepted: 18 January 2025

Available online:
21 March 2025

Keywords:

FLOOD
VULNERABILITY,
FUZZY AHP (FAHP),
ARCGIS,
KHORRAMABAD
CITY, URBAN
FACILITIES, RISK
ASSESSMENT,
SPATIAL ANALYSIS

Floods are known as one of the most common and destructive natural disasters due to their widespread destruction and huge economic losses. Khorramabad city is one of the cities at risk of flooding due to its experiences of floods in recent years, its location in a valley, heavy rains, the presence of rivers in the city (Khorramrod and Karganeh), and manipulation of the boundaries and beds of rivers. Therefore, investigating flood vulnerability plays an important role in reducing the damages and risks caused by floods.

One of the methods for investigating and analyzing flood vulnerability and urban facilities exposed to floods is the use of the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) to identify flood-prone and flood-vulnerable areas. Therefore, in this research, the fuzzy analytic hierarchy process method was used to prioritize the criteria. In this research, 12 criteria (worn texture, population density, road network, land use, height, slope, direction of slope, geology, distance from the river, soil science, land subsidence, and rainfall) were used to prepare a map of flood-prone and vulnerable areas.

The results of the analysis in this research showed that 38.17% of urban facilities are exposed to high and very high vulnerability, and administrative, commercial, and educational facilities have the highest level of vulnerability compared to other land uses to flooding. To reduce vulnerabilities, especially those of facilities to flooding, suggestions include improving the physical quality of urban facilities and buildings, organizing and improving the quality of river beds and boundaries, improving the condition of drainage, and using smart and advanced technologies to predict and warn of floods in order to reduce vulnerabilities.

*.Corresponding author :Dr.Mahin Nastaran

E-mail address: m.nastaran@aui.ac.ir

How to cite this article: Rahimi, A., & Nastaran, M. (2025). Vulnerability Analysis of Facilities Against Flood with Emphasis on AHP Fuzzy Method (Case Study: Khorramabad City). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), pp.99-122, DOI: <https://doi.org/10.22067/geoh.2025.89239.1506>



Extended Abstract

Introduction

Floods are among the most catastrophic natural hazards that can cause huge economic losses, damage to infrastructure and natural ecosystems, as well as death. Therefore, investigating flood vulnerability plays an important role in reducing the damages and risks caused by floods. A flood is a sudden flow of water that flows at high speed in a short time and causes destruction along with financial and human losses.

Khorramabad city has experienced floods 12 times from 1976 to 2005. One of the largest floods in Lorestan province is the flood of 2019, with the initial estimate of flood damage in Lorestan province exceeding 15 trillion rials. Fifteen people lost their lives and about 256 people were injured, and the city of Khorramabad had a huge share of these damages and casualties. Khorramabad city is one of the cities at risk of flooding due to its experiences of floods in recent years, its location in a valley, heavy rains, the presence of rivers in the city (Khorramrod and Karganeh), and manipulation of the boundaries and beds of rivers.

Considering the experiences of flood risk in Khorramabad city and despite numerous studies conducted in the field of flooding in regions and cities, no research has been conducted so far on the vulnerability analysis of urban facilities, especially using the FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process) method. Therefore, the purpose of the present study is to analyze the vulnerability of facilities through the FAHP method and then to describe the application of the FAHP method in hazards and crises in order to reduce vulnerabilities.

Material and Methods

This paper is a descriptive-analytical study. This research was conducted in ArcGIS 10.5 and Expert Choice 11 software. Data collection methods included library methods (books, articles, information on the 2019 detailed plan of Khorramabad city, meteorological information, and data from the Iranian Geological Organization and the Natural Resources Administration) and field methods (questionnaire and observation).

The criteria effective in flood vulnerability were selected through library studies and urban experts according to the location and characteristics of Khorramabad city, which include 12 criteria (worn texture, population density, road network, land use, height, slope, slope direction, geology, distance from the river, soil science, land subsidence, and rainfall). After the criteria are determined by experts, the Analytic Hierarchy Process (AHP) method is used. The AHP is one of the most comprehensive methods designed for decision-making with multiple criteria. This method allows the problem to be formulated hierarchically. This method is based on three basic steps:

1. Creating a pairwise comparison matrix,
2. Calculating the weights of the criteria, and
3. Estimating the compatibility ratio.

Additionally, in this research, the fuzzy logic method was used to standardize the criteria. The fuzzy logic method is used to standardize the criteria in cases where the units of measurement have different ranges with ranges of similarity from 0 to 1.

Results and Discussion

After preparing the maps of the information layers, questionnaires were distributed among the experts, in which a pairwise comparison of the criteria was made based on the value (importance) in the numerical range between 1 and 9. Finally, after completing the questionnaire, a matrix was prepared in the Expert Choice software and the summary of the experts' opinions was added to that matrix. The output of the Expert Choice software analysis shows the weight of each criterion, and according to the AHP, the higher the weight of the criterion, the greater the importance and value of that criterion, and vice versa. According to the software output, population density, rainfall, distance from the river, height, and land use were the most important and scored.

The Geographic Information System (GIS) provides a wide range of spatial analysis, regional analysis, and network analysis capabilities on various thematic layers. In the present study, the AHP method was used to weight the criteria and determine the criteria in priority (importance) and standardization with the fuzzy logic method.

After preparing the weighted maps of the criteria (layers), by combining the weighted layer maps through ArcGIS software, using the SUM fuzzy operator, the map of vulnerable areas was determined in 5 vulnerability classes: very low, low, medium, high, and very high. By overlapping the distribution map of each facility with the flood vulnerability zoning map, all facilities can be analyzed for flood vulnerability.

With the analyses conducted, the vulnerability of facilities was determined in 5 levels of vulnerability, according to which, 9.66% and 28.51% of facilities are in the very high and high vulnerability range, respectively, and a total of 38.17% of facilities are exposed to high and very high vulnerability. According to the analyses conducted, using the percentage and total area of facilities exposed to flood vulnerability and considering the area of each facility, the vulnerability value of each facility was calculated.

Furthermore, with the analyses conducted, it can be concluded that administrative, commercial, and educational uses have the highest vulnerability to flooding **with** 39.47%, 12.78%, and 11.78%, respectively, and religious and cultural uses have the lowest vulnerability to flooding with 0.84% and 0.38%, respectively.

Conclusion

The results of the analysis of this research showed that 38.17% of urban facilities are exposed to high and very high vulnerability, and administrative, commercial, and educational uses have the highest level of vulnerability compared to other uses to flooding. To reduce vulnerabilities, especially reducing the vulnerability of facilities to flooding, suggestions can be made such as:

- Improving the physical quality of urban facilities and buildings,
- Organizing and improving the quality of river beds and boundaries,
- Improving the condition of drainage, and
- Using smart and advanced technologies to predict and warn of floods in order to reduce vulnerabilities.

Finally, by achieving the research objectives in order to explain the application of the FAHP method, other applications of this method in reducing vulnerabilities can be mentioned, such as:

- Identifying zones and areas prone to vulnerability to crises,
- Correct location of emergency services to provide services during crises,

- Identifying and analyzing traffic nodes in times of crisis and correct routing in order for people to escape from crises and provide rapid services to people,
- Locating and identifying temporary accommodation, parking lots, and safe shelters during crises, and
- Correct location of urban facilities and residential areas to reduce vulnerabilities.

Previous research on the flood in Khorramabad city has addressed issues such as:

- Investigating the cause of the Khorramabad flood incident,
- Zoning of the entire city and villages, agricultural lands and roads, as well as
- Examining the role of floods in changing river beds and their impact on rural communities.

The difference between the present research and other research conducted is in analyzing the vulnerability of Khorramabad city facilities to flooding. Moreover, the research conducted so far has not examined facilities because the issue of urban facilities is considered an important issue in the field of urban planning. Similarly, in this research, the combined method of FAHP, which is a relatively new method, was used. One of the applications of this method is the analysis of risks and crises.



تحلیل آسیب پذیری زیرساخت‌های روبنایی در برابر سیل با تاکید بر روش AHP Fuzzy (مورد مطالعه: شهر خرم آباد)

امیر رحیمی^۱، مهین نسترن^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد برنامه ریزی شهری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران
^۲ دانشیار گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۵/۱۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹ کلمات کلیدی: آسیب‌پذیری سیلاب روش سلسله مراتب فازی (FAHP) نرم‌افزار ARCGIS شهر خرم‌آباد تأسیسات شهری ارزیابی ریسک تحلیل مکانی	سیلاب به دلیل تخریب گسترده و خسارات اقتصادی بسیار زیاد به عنوان یکی از متداول ترین بلایای طبیعی شناخته می‌شود. شهر خرم آباد به دلیل تجارب سیل خیزی در سال‌های اخیر و موقعیت دره‌ای بودن شهر، بارش‌های فراوان، وجود رودخانه‌ها در شهر (خرم رود و کرگانه)، دستکاری در حریم و بستر رودخانه‌ها، جزء شهرهای در معرض مخاطره سیلاب می‌باشد. یکی از روش‌های بررسی و تحلیل آسیب پذیری سیل و زیرساخت‌های شهری در معرض سیل، استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (AHP FUZZY) به منظور شناسایی پهنه‌های سیل خیز و آسیب پذیر سیل می‌باشد، در این پژوهش، از ۱۲ معیار (بافت فرسوده، تراکم جمعیت، شبکه معابر، کاربری، ارتفاع، شیب، جهت شیب، زمین شناسی، فاصله از رودخانه، خاک‌شناسی، فرونشست زمین و میزان بارندگی) به منظور تهیه نقشه‌ی پهنه‌های آسیب پذیر سیل استفاده شد. مطابق روش فرآیند تحلیلی سلسله مراتبی، معیارها توسط کارشناسان امتیازدهی و سپس در نرم افزار EXPERT CHOICE وزن دهی شدند و با استفاده از مدل منطق فازی، نقشه لایه‌های اطلاعاتی معیارها مورد فازی سازی قرار گرفتند. در نهایت با همپوشانی نقشه‌های وزن دهی شده برای هر معیار در نرم افزار ARC GIS، نقشه پهنه‌های سیل خیز و آسیب پذیر تهیه شد. باهمپوشانی نقشه پهنه بندی شده سیل با نقشه پراکنش زیرساخت‌های روبنایی، نقشه‌ی نهایی آسیب پذیری زیرساخت‌های روبنایی شهر خرم آباد تهیه گردید. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که ۳۸/۱۷٪ از زیرساخت‌های روبنایی در معرض آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد سیل قرار دارند و کاربری‌های اداری و تجاری به ترتیب بیشترین آسیب‌پذیری و کاربری‌های فرهنگی و مذهبی کمترین آسیب‌پذیری را در برابر سیل دارند. درنهایت با شناسایی پهنه‌های سیل خیز و آسیب پذیر سیل، لازم است اقداماتی به منظور افزایش ایمنی و مقاوم سازی زیرساخت‌ها در جهت کاهش آسیب پذیری‌های ناشی سیل، توسط مدیران و کارشناسان شهری انجام گیرد.

مقدمه

هنگام بحث درباره هر فاجعه، ابتدا باید آن را بر اساس نوع آن متمایز کرد. به طور کلی، سه نوع بلا وجود دارد طبیعی، انسان ساز و ترکیبی. بلایای طبیعی غالباً «رخداد ذاتی طبیعت» نامیده می‌شوند، در حالی که بلایای انسان‌ساز که منشاء آن‌ها فعالیت انسان‌ها به طور عمدی یا غیر عمدی هستند که بر تعادل اکولوژیکی تأثیر می‌گذارند و بلایای ترکیبی، از ادغام فعالیت‌های انسانی و نیروهای طبیعی ناشی می‌شود. از بین همه بلایا، دوره ای ترین و شایع ترین آن سیل است که هرچند سال یکبار رخ می‌دهد (Shaluf, 2007). بررسی آثار و اطلاعات خسارت‌های ناشی از بحران سیل در ایران و جهان بسیار نگران کننده می‌باشد و بحران سیل، یکی از سه بلایای طبیعی و اصلی ایران است (Servati, Ahmadi, Nosrati & Mezban, 2013). سیل به دلیل شکست مسیرهای طبیعی و سیستم‌های زهکشی در نگهداری آب اضافی در طول بارندگی زیاد و بلافاصله پس از آن ایجاد می‌شود (Gacu, Monjardin, Senoro & Tan, 2022). سیل از جمله مخاطرات طبیعی فاجعه‌باری است که می‌تواند باعث خسارات اقتصادی هنگفت، آسیب به زیرساخت‌ها و اکوسیستم‌های طبیعی و همچنین مرگ شود (Xiong et al., 2022).

امروزه چندین روش برای شناسایی پهنه‌های سیل خیز و آسیب پذیر وجود دارد، که از جمله این روش‌ها می‌توان به رویکردهای تصمیم‌گیری چند معیاره بر پایه روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)^۱ و منطق فازی (FL)^۲ اشاره نمود (Malik et al., 2022). روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی به طور گسترده توسط بسیاری از پژوهشگران برای پرداختن به مسائل مختلف تصمیم‌گیری در زمینه‌های مختلف استفاده شده است (Saucedo, Salais, Aguilar & Marmolejo-Sa, 2024). روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یک رویکرد تصمیم‌گیری چند هدفه و چند معیاره است که کاربر را قادر می‌سازد تا به مقیاسی از اولویت‌های برگرفته از مجموعه‌ای از گزینه‌ها برسد و برای کاهش تصمیمات پیچیده به مجموعه‌ای از مقایسه‌های زوجی و سپس ترکیب نتایج مفید است، علاوه بر این، جهت‌گیری در فرآیند تصمیم‌گیری را می‌توان به طور موثر از طریق این تکنیک حذف کرد زیرا سازگاری نتیجه را ارزیابی می‌کند (Arulbalaji, Padmalal & Sreelash, 2019). روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی می‌تواند به طور موثر در مطالعات مقیاس منطقه‌ای و محلی با دقت بهتر اعمال شود (Dano et al., 2019).

منطق فازی (FL) بر پایه نظریه مجموعه‌های فازی استوار است. در تئوری کلاسیک مجموعه‌ها، یک عنصر، یا عضو مجموعه هست یا نیست. در حقیقت عضویت عناصر از یک الگوی صفر و یک باینری تبعیت می‌کند. اما تئوری مجموعه‌های فازی این مفهوم را بسط می‌دهد و عضویت درجه بندی شده را مطرح می‌کند. به این ترتیب که یک عنصر می‌تواند تا درجاتی و نه کامل عضو یک مجموعه باشد، با توجه به اینکه پدیده‌هایی مانند سیلاب تحت تأثیر عوامل بسیاری قرار دارند و این عوامل قطعی و صددرصدی نیستند، بنابراین بهتر است در مطالعه چنین پدیده‌هایی از مدل فازی استفاده شود (Mokhtari Hashi & Rahimi, 2016). از این جهت در

1 Analytical Hierarchy Process

2 Fuzzy Logic

این پژوهش از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی برای شناسایی پهنه های آسیب پذیر سیل و سپس تحلیل آسیب پذیری زیرساخت های روبنایی شهر خرم آباد درمواجه با سیل استفاده می شود، تاکنون مطالعات متعددی در زمینه کاربرد روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی برای شناسایی محدوده های مستعد سیل پذیری انجام شده است که ازجمله این پژوهش ها می توان به پژوهش های زیر اشاره کرد:

صالحی و همکاران (Salehi, Rafi, Farzadbehtash & Agha Babaei, 2013) طی پژوهشی به پهنه‌بندی خطر سیلاب شهری در شهر تهران با استفاده از نرم افزار GIS^۱ و روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی پرداختند. این پژوهش با استفاده از ۵ معیار فاصله از شبکه زهکشی، تجمع جریان، شیب، ارتفاع و کاربری اراضی انجام گرفت، در نهایت نقشه خطر نهایی با اعمال وزن های معیارها و طبقه‌های آن‌ها به دست آمد. در پژوهشی اسماعیلی و همکاران (Esmaeili Alavijeh, Karimi & Alavipoor, 2016) به ارزیابی آسیب پذیری منطقه ۲۲ تهران در برابر سیل پرداختند و از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی از معیارهای شیب، خاک، فاصله از رود، زمین شناسی، ارتفاع، کاربری اراضی و جمعیت استفاده گردید. پس از وزن دهی، معیارهای آسیب پذیری در محیط Arc Gis فازی سازی شدند و در نهایت از عملگرهای فازی برای همپوشانی لایه ها استفاده شد.

در پژوهشی آذر مهر و خوش نیت (Azarmehr & khosh niyat, 2021) به ارزیابی آسیب پذیری منطقه ۶ در برابر سیل با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی پرداختند. در این پژوهش معیارهای مورد بررسی، شامل شیب، ارتفاع، پوشش گیاهی، کاربری و کانال ها و مسیل های موجود می باشد. نتایج حاصل از تحلیل سلسله مراتبی نشان می دهد که کاربری اراضی با وزن ۰/۳۲۶ و پوشش گیاهی با وزن ۰/۰۷۵ به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر در میزان آسیب پذیری در حوضه منطقه ۶ شهر تهران هستند. در پژوهشی وجدانی نوذر و گیوه چی (Vejdani Nozar & Givvehchi, 2022) به ارائه مدل ارزیابی خطر سیل در استان همدان به منظور رده بندی آسیب پذیری و پیامدهای محتمل در مراکز جمعیتی پرداختند در این پژوهش با پیاده سازی و ترکیب لایه‌های استاندارد پارامترهای تأثیرگذار از طریق AHP فازی و لایه خطر سیل که از طریق ماتریس استاندارد شده نظرات کارشناسان در نرم افزار GIS به دست آمده، نقشه خطر سیل تهیه و سپس مراکز جمعیتی (شهرها) طبقه بندی شدند و شهر همدان در پهنه ریسک نسبی زیاد تا خیلی زیاد قرار گرفت. در مطالعه‌ای یانگ و همکاران (Yang, Ding & Hou, 2013) به کاربرد روش AHP فازی برای ارزیابی خطر سیل با استفاده از مدل ترکیبی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی پرداختند. این روش شامل ارزیابی و پیش بینی خطر سیل برای به دست آوردن رتبه بندی عوامل خطر و پیش بینی جامع خطر سیل و سپس تجزیه و تحلیل اقدامات واکنش به خطر سیل است.

اکمکیگلو و همکاران (Ekmekcioglu, Koc & Ozger, 2021) در مطالعه ای به ارزیابی خطر در استانبول با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی که شامل سیزده معیار آسیب‌پذیری سیل و خطر است پرداختند. برای به دست آوردن وزن معیارها، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی اتخاذ شد. در بین تمامی معیارها، کاربری

زمین و دوره بازگشت به ترتیب مهم‌ترین معیارهای آسیب‌پذیری و خوشه‌های خطر بودند. وزن معیارهای محاسبه شده از طریق روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی با داده‌های گرفته شده از سازمان‌های مختلف با توجه به هر منطقه برای محاسبه امتیاز خطر نواحی ادغام شد. در نتیجه، امتیازات خطر منطقه برای تهیه نقشه خطر سیل استانبول استفاده شد (Dutta & Deka, 2024). در مطالعه‌ای به ارزیابی خطر سیل با مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی برای تجزیه و تحلیل حساسیت در دشت سیلابی براهماپوترا پرداختند، در این پژوهش ۱۶ پارامتر در نظر گرفته شد که با مدل فرآیند تصمیم‌گیری چند معیاره تحلیل سلسله مراتبی مبتنی بر (MCDM-AHP)^۱ برای شناسایی مناطق بالقوه خطر سیل استفاده شد. نتایج نشان داد که بیش از ۲۸ درصد از مساحت کل منطقه در خطر سیل زیاد تا بسیار زیاد قرار دارد.

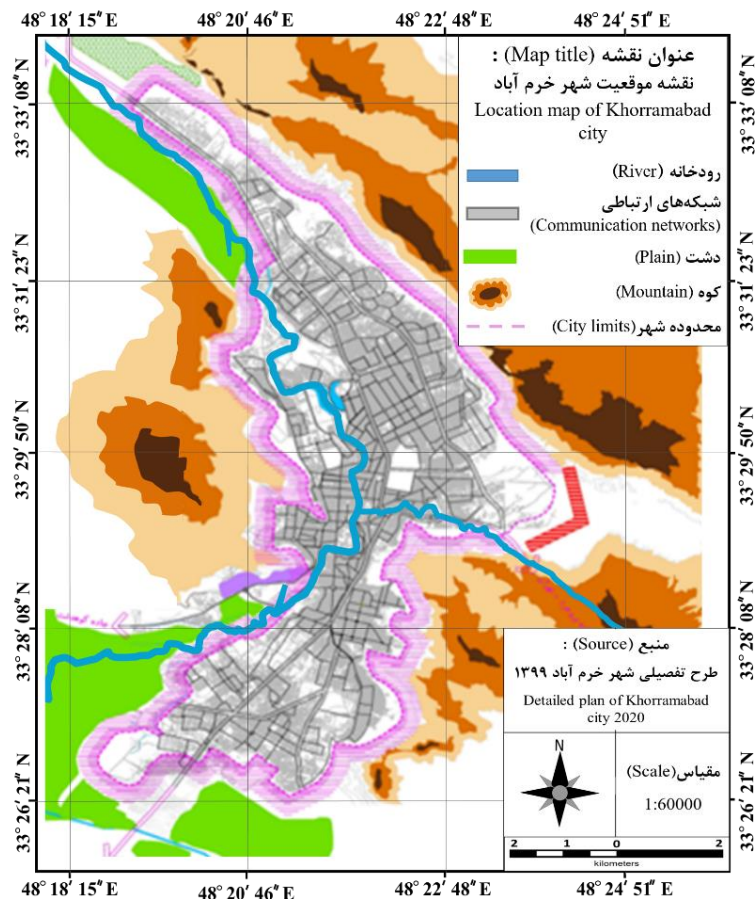
شهر خرم آباد در طول سال‌های وقوع سیل (۱۳۵۵ تا ۱۳۸۴) ۱۲ بار سیل رخ داده (Rezaei Rashno & Haghzad, 2015) و یکی از بزرگترین سیلاب‌های استان لرستان سیل سال ۱۳۹۸ می باشد، که برآورد اولیه خسارت سیل در استان لرستان بیش از ۱۵ هزار میلیارد ریال است و همچنین ۱۵ نفر بر اثر سیل جان خود را از دست دادند و حدود ۲۵۶ نفر نیز مصدوم شدند و شهر خرم آباد سهم عظیمی از این خسارات و تلفات را داشت (Iranian Red Crescent Society, 2019). با در نظر گرفتن تجارب و سیل خیزی شهر خرم آباد و علی رغم مطالعات فراوان انجام شده در زمینه سیلاب مناطق و شهرها، تاکنون پژوهشی به تحلیل آسیب‌پذیری زیرساخت‌های روبنایی شهر که در حوزه شهری بسیار مهم هستند، نپرداخته است، بنابراین پژوهش حاضر با هدف تحلیل میزان آسیب‌پذیری زیرساخت‌های روبنایی شهر خرم آباد در برابر سیل و سپس تشریح کاربرد روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی در زمینه مخاطرات و بحران‌ها در راستای کاهش آسیب‌پذیری‌ها، انجام شده است.

منطقه مورد مطالعه

شهر خرم آباد در جنوب غربی کشور و به طول ۱۵ و عرض ۱۲ کیلومتر، مرکز استان لرستان، با موقعیت هندسی به طول ۴۸ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و عرض ۳۳ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی در ارتفاع ۱۱۷۱ متری از سطح دریا قرار دارد. شکل ۱ موقعیت شهر خرم آباد را نشان می‌دهد.

خرم آباد شهری کوهستانی و دره‌ای است؛ شهر در دو طرف بستر رودخانه خرم رود ساخته شده که زمین‌های هموار آن چندان وسعت ندارند. افزایش جمعیت شهر به هر علت موجب گسترش فیزیکی شهر شده تا جایی که پس از به کارگیری زمین‌های هموار کنار رودخانه شهر به سوی زمین‌های ناهموار و کم ارتفاع و خاکریزهای پای کوه هدایت گردیده و از این امر ناگزیر بوده است. بخش شمالی شهر چهره‌ی کوهستانی و ناهموار، و بخش جنوبی شهر چشم اندازی جلگه‌ای و هموار دارد. کالبد فیزیکی شهر متأثر و تابعی از طبیعت آن است. شهر خرم آباد دارای محدودیت فضا و زمین بوده، بافتی متراکم و متمرکز دارد. شهر خرم آباد، چندین بافت فرسوده و ناکارآمد دارد که تشدید کننده آسیب‌پذیری هستند همچنین وجود دو رودخانه (خرم رود و کرگانه) و چندین چشمه، چاه و قنات که سبب آب دهی بالای رودخانه‌ها شده، زمینه را برای سیل‌پذیری

شهر خرم آباد فراهم می‌کند (Khorramabad city comprehensive plan, 2020). طبق آخرین سرشماری سال ۱۳۹۵ شهر خرم آباد ۳۷۳۴۱۶ نفر جمعیت دارد (General Population and Housing Census, 2016).



شکل ۱- موقعیت شهر خرم آباد
Fig .1. Location of Khorramabad city

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نوع توصیفی-تحلیلی می‌باشد، گردآوری داده‌ها از دو روش کتابخانه‌ای (کتاب‌ها، مقالات، مطالعه اسناد بالادست، اطلاعات طرح جامع و طرح تفصیلی ۱۳۹۹ شهر خرم آباد، اطلاعات هواشناسی و سازمان زمین‌شناسی کشور و اداره منابع طبیعی) و روش میدانی شامل (پرسشنامه و مشاهده) می‌باشد. در پهنه‌های آسیب‌پذیری سیل، معیارهای مختلفی دخالت دارند، که با مطالعات کتابخانه‌ای و با مراجعه به کارشناسان مربوطه در حوزه‌های شهرسازی، برنامه‌ریزی شهری، عمران و مخاطرات طبیعی، معیارهای موثر در آسیب‌پذیری سیل با توجه به موقعیت و خصوصیات شهر خرم آباد انتخاب شدند که این معیارها شامل ۲ معیار اصلی (معیارهای کالبدی و طبیعی) و ۱۲ زیر معیار (بافت فرسوده، تراکم جمعیت، شبکه معابر،

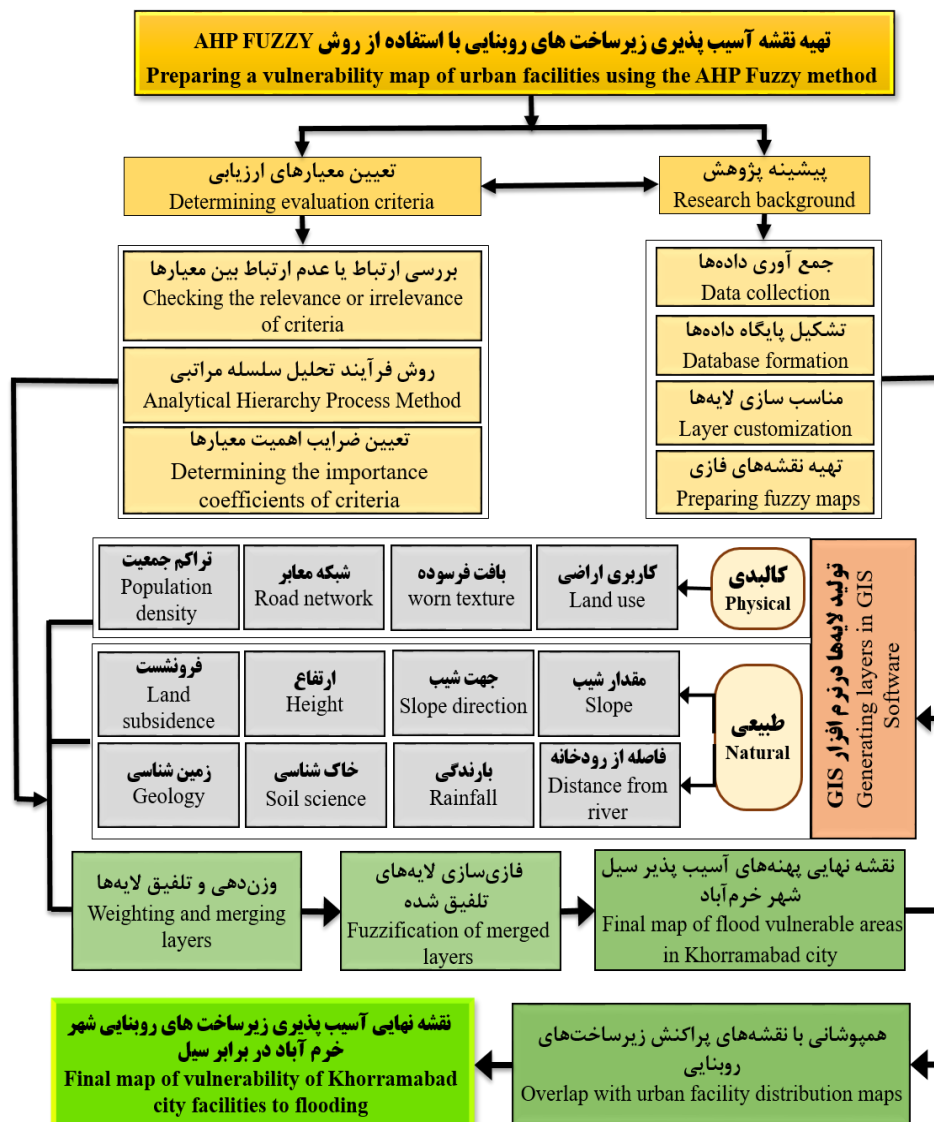
کاربری، ارتفاع، شیب، جهت شیب، زمین شناسی، فاصله از رودخانه، خاک شناسی، فرونشست و میزان بارندگی می باشند.

پس از مشخص شدن معیارها توسط کارشناسان، از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی استفاده شد، روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، توسط توماس ال ساعتی در سال ۱۹۸۰ مطرح شد این روش یکی از جامع ترین روش های طراحی شده برای تصمیم گیری با معیارهای چند گانه است (Ghodsipour, 2019). این روش امکان فرموله کردن مساله را به صورت سلسله مراتبی فراهم می کند و همچنین امکان در نظر گرفتن معیارهای مختلف کمی و کیفی را در مساله دارد. این روش بر مبنای سه گام اساسی : ۱- ایجاد ماتریس مقایسه زوجی ۲- محاسبه وزن معیارها و ۳- برآورد نسبت سازگاری می باشد (Zebardast, 2011). مطابق این روش، ماتریس زوجی که شامل پرسشنامه ای با ۳۴ سوال می باشد تهیه و تحویل ۲۵ نفر از کارشناسان مربوطه داده شد، که این سوالات درواقع مقایسه زوجی (دو به دویی) معیارها می باشند، به هرکدام از معیارها نسبت به دیگری براساس درجه اهمیت (ارزش) می توان عدد ۱ تا ۹ داده شد. پس از تکمیل ماتریس ها و اولویت بندی معیارها توسط کارشناسان، ماتریس های زوجی وارد نرم افزار Expert Choice شدند. در نتیجه وزن نسبی هریک از معیارها به دست آمد که این وزن ها، داده های اصلی برای تحلیل ارزیابی چندمعیاره و تعیین معیارهای پراهمیت در محیط GIS برای تهیه نقشه پهنه های آسیب پذیر سیل هستند. نرم افزار اکسپرت چویس^۱ نرم افزاری برای انجام روش تحلیل سلسله مراتبی و مقایسات زوجی می باشد پایه ی این روش برای وزن دهی به تصمیمات با استفاده از روش مقایسه زوجی است اما چون به مرور تعداد عناصر برای بررسی افزایش می یابد و کار مقایسه زوجی را دشوار می کند؛ بنابراین به یک نرم افزار برای انجام فرآیند سلسله مراتبی نیاز است از نرم افزار اکسپرت چویس استفاده می شود (Aghaei & Maziar, 2007). یکی از کاربردهای روش منطق فازی^۲ استانداردسازی (فازی سازی) معیارها، درمواقعی که واحدهای اندازه گیری دامنه های متفاوت داشته باشند را با دامنه های همسانی ۰ تا ۱ استاندارد سازی می کنند (Ziari, Rajai & Darabkhani, 2020).

در پژوهش حاضر از روش تحلیل سلسله مراتبی برای وزن دهی به معیارها و تعیین معیارهای در اولویت (پراهمیت) و استانداردسازی با روش منطق فازی، استفاده شد و پس از تهیه نقشه های وزن دهی شده معیارها (لایه ها) با تلفیق نقشه های لایه های وزن دهی شده از طریق نرم افزار Arc Gis، توسط عملگر فازی SUM، نقشه ی پهنه های آسیب پذیر، در ۵ طبقه آسیب پذیری خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد مشخص شد. و با همپوشانی نقشه ی پراکنش هر زیرساخت با نقشه ی پهنه بندی آسیب پذیری سیل می توان کلیه زیرساخت های روبنایی را مورد بررسی برای میزان آسیب پذیری سیل قرار داد.

1 Expert choice

2 Fuzzy logic

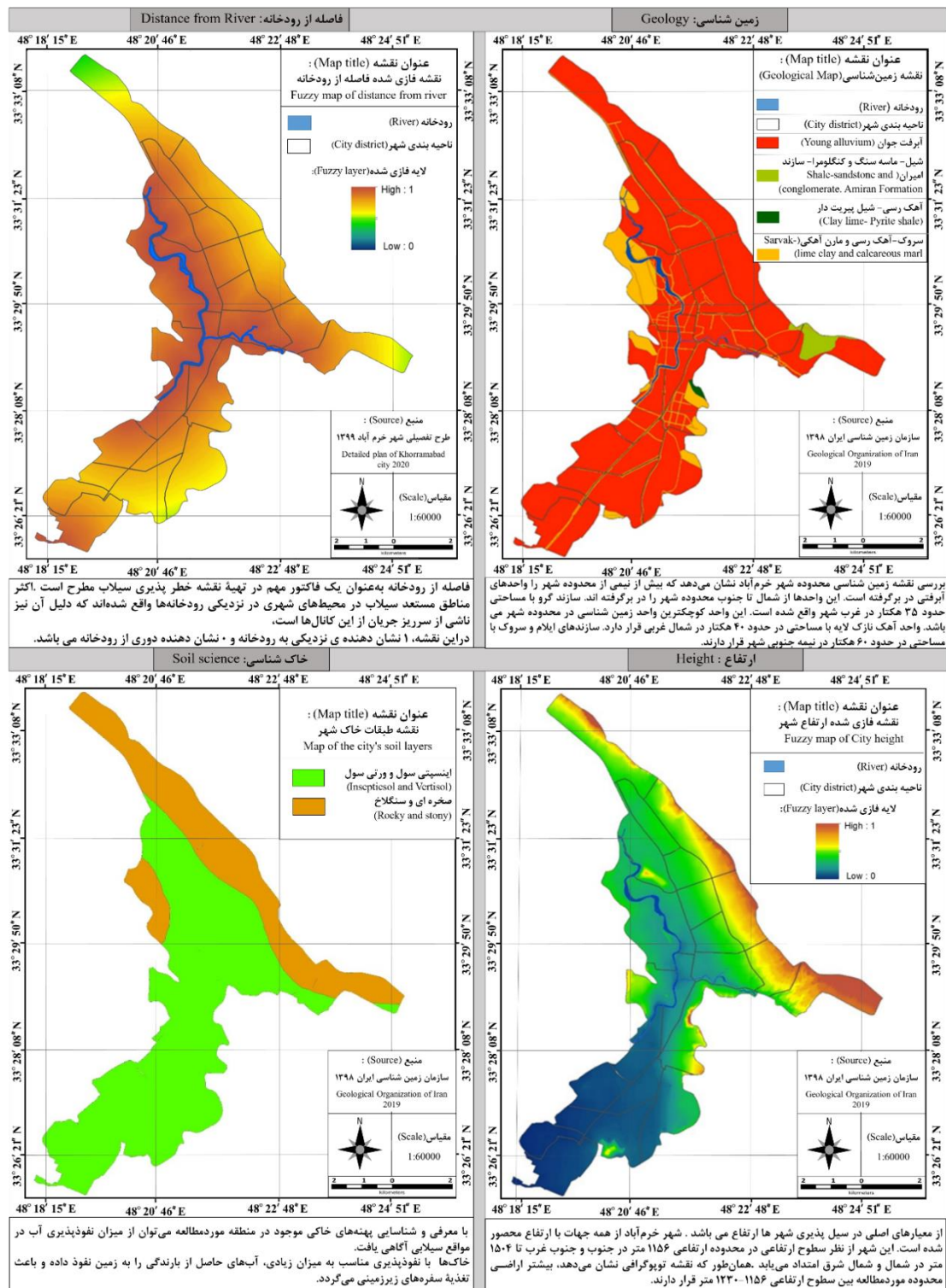


شکل ۲- مدل مفهومی مراحل انجام پژوهش

Fig. 2. Conceptual model of research stages

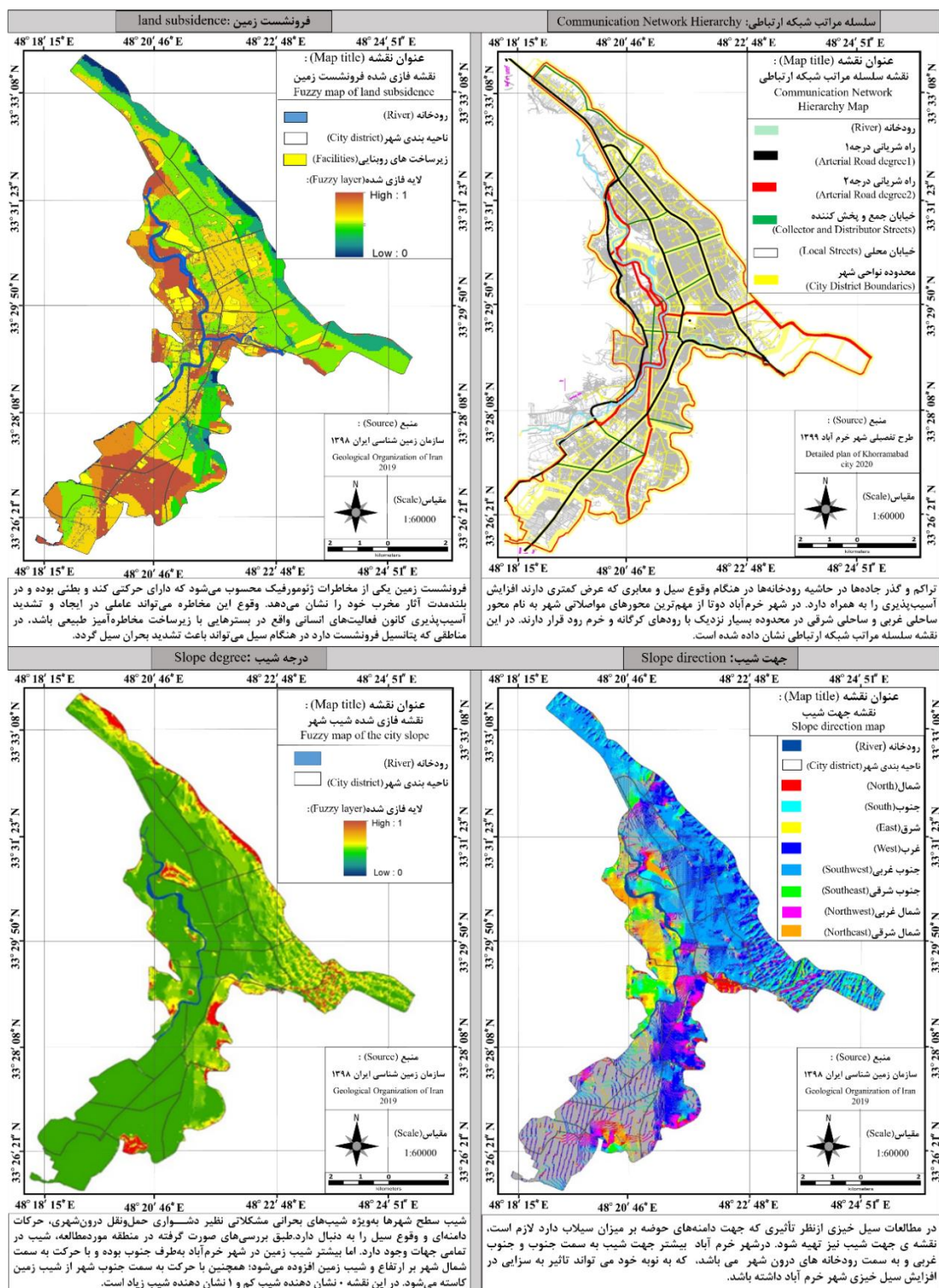
در شکل ۲، روند انجام پژوهش ترسیم شده است و مطابق شکل، این پژوهش از ۲ معیار که شامل ۱۲ زیرمعیار می باشد، برای تهیه نقشه پهنه بندی آسیب پذیری سیل استفاده شده است. ابتدا تمامی نقشه های لایه ها تهیه و تا حد امکان فازی سازی شده اند. منابع مربوطه جهت اخذ نقشه ها و داده های نقشه ها شامل سازمان زمین شناسی کشور سال ۱۳۹۸، پایگاه داده های جغرافیایی (ژئو دیتا) سال ۱۳۹۸، طرح تفصیلی ۱۳۹۹ شهر خرم آباد می باشد.

در شکل‌های ۴،۳ و ۵ نقشه‌های هرکدام از معیارهای مورد بررسی تهیه شد در کادر پایین هر نقشه، توضیحاتی در خصوص تاثیر آن معیار بر آسیب پذیری سیل و ویژگی های آن معیار در شهر خرم آباد داده شده است. مقیاس کلیه نقشه ها ۱:۶۰۰۰۰ می‌باشد. لازم به ذکر است که لایه‌ی بارش به دلیل وسعت کم شهر خرم آباد و یکسانی بارش در تمام محدوده شهر خرم آباد از تهیه نقشه‌ی آن صرف نظر شده و وزن آن که بیشترین وزن را در بین معیارهای طبیعی دارد در تهیه نقشه نهایی آسیب پذیری استفاده شده است.



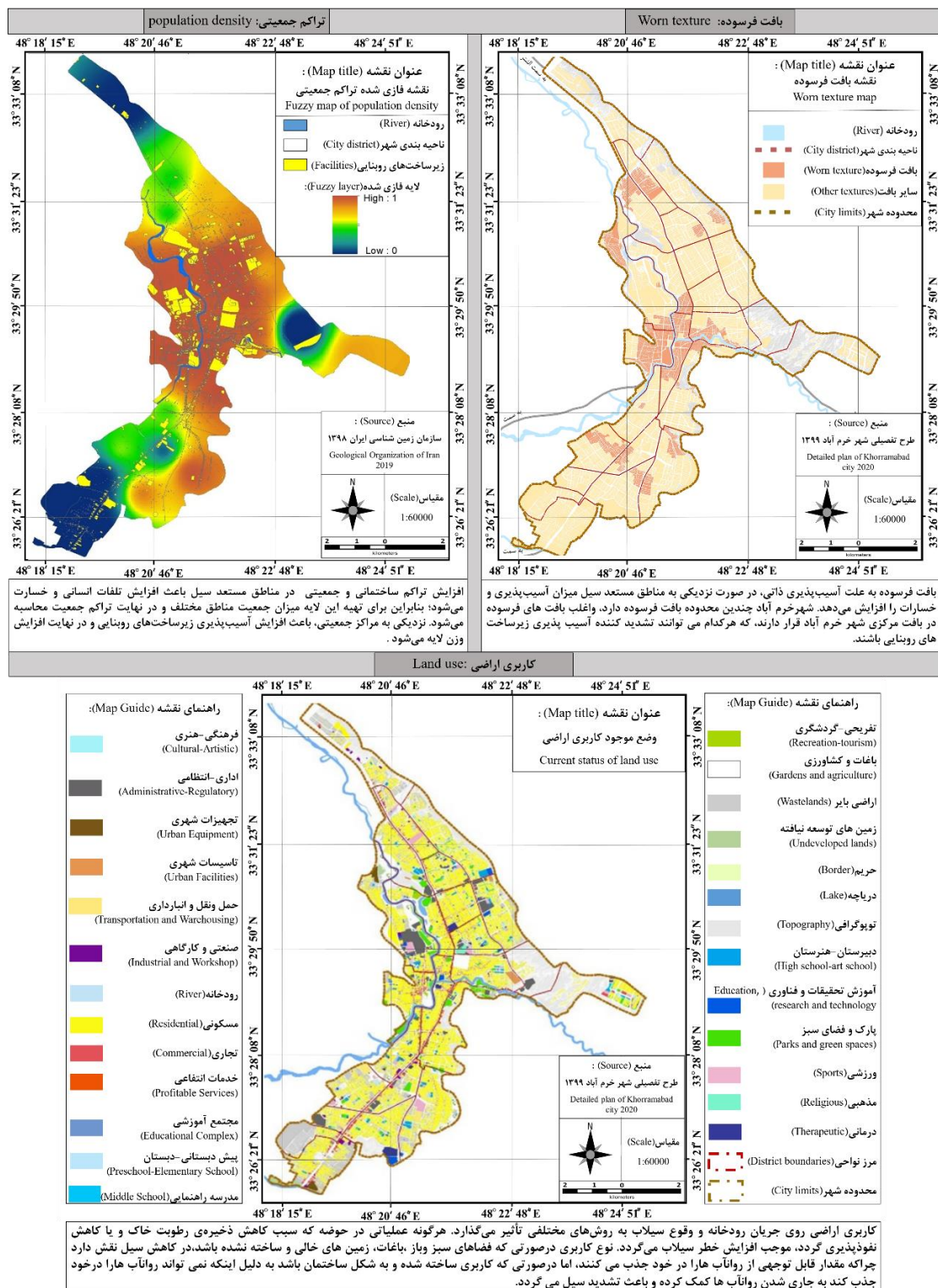
شکل ۳- نقشه‌های لایه‌های موثر در سبیل پذیری شهر خرم آباد

Fig. 3. Maps of effective layers in flood susceptibility of Khorramabad city



شکل ۴- نقشه‌های لایه‌های موثر در سیل پذیری شهر خرم آباد

Fig.4. Maps of effective layers in flood susceptibility of Khorramabad city



شکل ۵- نقشه‌های لایه‌های مؤثر در سیل پذیری شهر خرم آباد

Fig. 5. Maps of effective layers in flood susceptibility of Khorramabad city

بحث و نتایج

پس از تهیه نقشه های لایه های اطلاعاتی، پرسشنامه ها بین کارشناسان توزیع شد که در این پرسشنامه مقایسه دو به دویی معیارها براساس ارزش (اهمیت) در طیف اعدادی بین ۱ تا ۹ انجام گرفته است. در نهایت، پس از تکمیل پرسشنامه، ماتریسی در نرم افزار Expert Choice تهیه و جمع بندی نظرات کارشناسان (نتیجه مقایسه زوجی معیارها)، به آن ماتریس اضافه شد. در نهایت خروجی تحلیل نرم افزار Expert Choice وزن نسبی هر معیار را نشان می دهد و مطابق روش تحلیل سلسله مراتبی هرچقدر وزن معیار بیشتر باشد نشان دهنده گزینه برتر و ارزش بالای آن معیار می باشد و بالعکس.

جدول ۱- مقایسه زوجی معیارهای کالبدی مورد ارزیابی (منبع: خروجی نرم افزار Expert Choice11)

Table 1-Pairwise comparison of physical criteria being evaluated (Source: Expert Choice11 software output)

		Population	Land use	Road Netw	Worn Textu
Population Density	تراکم جمعیتی		1/0	2/0	3/0
Land use	کاربری			1/0	2/0
Road Network	شبکه ارتباطی				1/0
Worn Texture	بافت فرسوده	Incon: 0/03			

جدول ۲- مقایسه زوجی معیارهای طبیعی مورد ارزیابی (منبع: خروجی نرم افزار Expert Choice11)

Table 2-Pairwise comparison of natural criteria being evaluated (Source: Expert Choice11 software output)

	Rain	Distance fr	Height	Slope	Direction o	Geology	Land Subs	Soil Scienc
Rain	بارندگی		2/0	3/0	5/0	6/0	6/0	7/0
Distance from River	فاصله از رودخانه			2/0	4/0	5/0	5/0	6/0
Height	ارتفاع				3/0	3/0	4/0	5/0
Slope	شیب					3/0	3/0	4/0
Direction of Slope	جهت شیب						3/0	2/0
Geology	زمین شناسی							2/0
Land Subsidence	فرونشست زمین							2/0
Soil Science	خاک شناسی	Incon: 0/05						

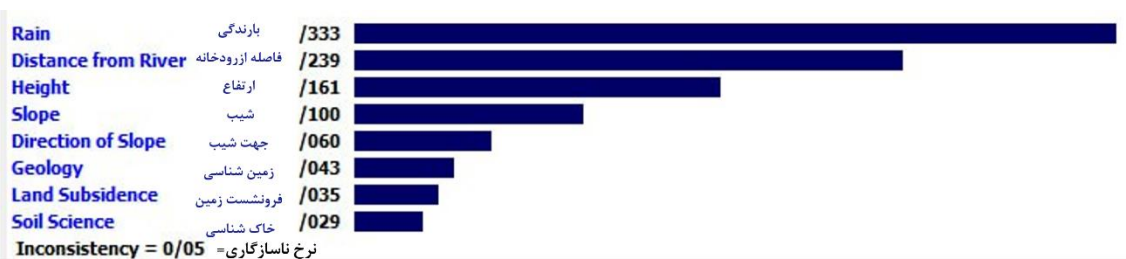
جدول های ۱ و ۲، نشان دهنده ماتریس های ارزش گذاری معیارها و مقایسه دویه دویی معیارها می باشد. که جمع بندی نظرات کارشناسان می باشد. پس از امتیازدهی به معیارها در نرم افزار Expert Choice، وزن نهایی معیارها مشخص شد.



شکل ۶- نمودار وزن نسبی معیارهای کالبدی مؤثر در وقوع سیلاب

(منبع: خروجی نرم افزار Expert Choice11)

Fig. 1. Relative weight chart of physical criteria affecting flood occurrence
(Source: Expert Choice11 software output)



شکل ۷- نمودار وزن نسبی معیارهای طبیعی مؤثر در وقوع سیلاب

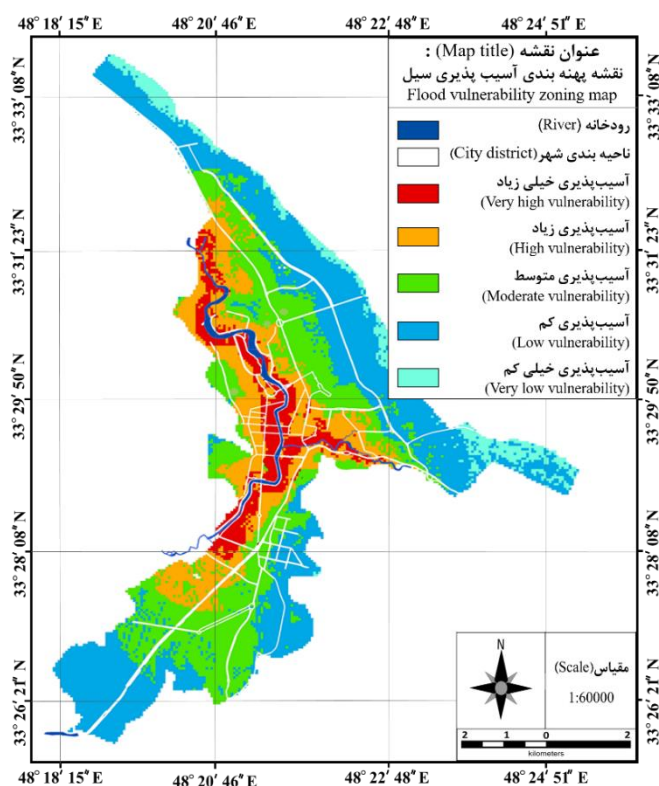
(منبع: خروجی نرم افزار Expert Choice11)

Fig.7. Relative weight chart of natural criteria affecting flood occurrence
(Source: Expert Choice11 software output)

با توجه به خروجی‌های نرم افزار Expert Choice (شکل ۶ و ۷) وزن نسبی معیارها به دست آمد که معیارهای تراکم جمعیتی، بارندگی، کاربری و فاصله از رودخانه از اهمیت (ارزش) بیشتر نسبت به سایر معیارها برخوردار هستند و در مرحله همپوشانی لایه‌ها هم، وزن بیشتری به این معیارها داده می‌شود. نرخ ناسازگاری تحلیل‌های انجام شده ۰/۰۳ و ۰/۰۵ می‌باشد که مقدار آن کمتر از ۰/۱ می‌باشد، و نشان‌دهنده اعتبار و صحت مقایسه‌های انجام شده است (Zebardast, 2011).

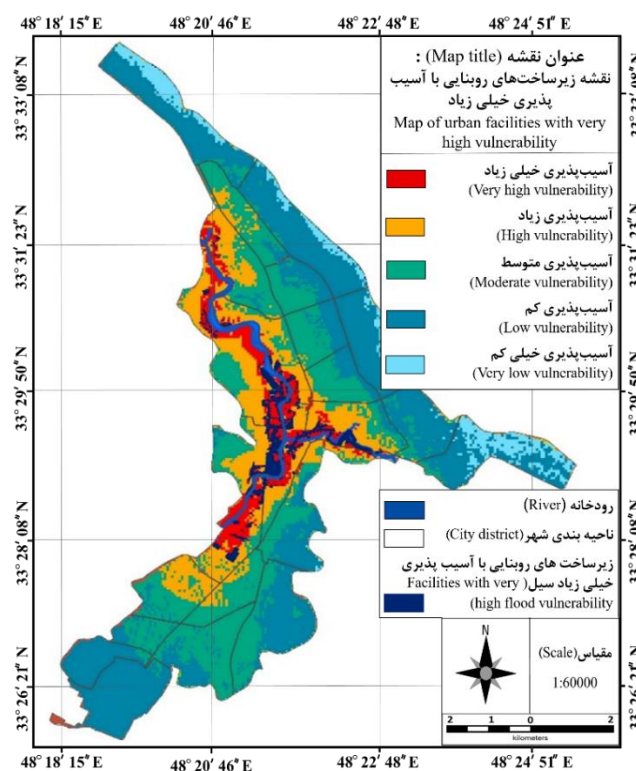
هم پوشانی لایه‌ها و تهیه نقشه نهایی پهنه‌های سیل خیز و آسیب پذیر

سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) طیف گسترده‌ای از امکانات تحلیل فضایی، تحلیل ناحیه‌ای و تحلیل شبکه را بر روی لایه‌های موضوعی مختلف فراهم کرده است؛ اما اغلب به منظور رسیدن به پارامترهای مورد نیاز که بر اساس آن تصمیم‌گیری صورت می‌گیرد، ضروریست که تحلیل فضایی یا سایر محاسبات با مدل‌های خارجی ارتباط یابد. بدین منظور در این تحقیق از مدل ترکیبی (AHP Fuzzy) وبا تلفیق لایه‌های وزن دهی شده در قالب سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) توسط عملگر فازی SUM فرآیند همپوشانی وزنی لایه‌ها صورت گرفت نقشه پهنه بندی نهایی محدوده سیل خیزی از کمترین تا بیشترین میزان آسیب پذیری مشخص شد.



شکل ۸- نقشه پهنه بندی آسیب پذیری سیل
Fig.8. Flood vulnerability zoning map

پس از همپوشانی نقشه ۱۲ لایه (معیار) نقشه پهنه بندی آسیب پذیری و سیل خیزی شهر خرم آباد شکل به دست آمد (شکل ۸). پهنه بندی سیل یکی از بهترین روش ها برای برنامه ریزی و شناسایی مناطق حساس سیل با هدف کاهش خسارات سیل می باشد (Rad, Vafakhah & Gholamali Fard, 2018). از کاربرد نقشه های پهنه بندی می توان به تعیین بستر و حریم رودخانه ها، مطالعه و توجیه اقتصادی طرح های عمرانی، پیش بینی و هشدار سیل، عملیات امداد و نجات، بیمه سیل و به ویژه برنامه ریزی شهر جهت کاهش آسیب پذیری اشاره نمود (Sheikh Alishahi, Jamali & Hassanzadeh Nafouti, 2016). یکی از کاربردهای مهم نقشه های پهنه بندی سیل، تحلیل آسیب پذیری زیرساخت های شهری می باشد، بدین منظور پژوهش حاضر پس از تهیه نقشه ی پهنه سیل خیز و آسیب پذیر با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی به تحلیل آسیب پذیری زیرساخت های روبنایی شهر خرم آباد در برابر سیل که شامل ۱۲ کاربری (فضای سبز، اداری، آموزشی، تجاری، ورزشی، نظامی، تفریحی- گردشگری، بهداشتی- درمانی، مذهبی، صنعتی، فرهنگی، تاریخی) می باشد پرداخته است. با همپوشانی نقشه های پراکنش زیرساخت های روبنایی با نقشه ی پهنه بندی شده سیل، نقشه ی آسیب پذیری زیرساخت های روبنایی شهر خرم آباد در برابر سیل با ۵ سطح آسیب پذیری به دست آمد.



شکل ۹- نقشه ی زیرساخت های روبنایی در معرض خطر سیل

Fig.9. Map of urban facilities with very high vulnerability

با تلفیق نقشه‌ها و تحلیل‌های انجام شده، میزان آسیب پذیری زیرساخت های روبنایی بر اساس مساحت و درصد در ۵ سطح آسیب پذیری، از آسیب پذیری خیلی کم تا آسیب پذیری خیلی زیاد به دست آمد (جدول ۳) و نقشه زیرساخت‌های روبنایی با آسیب پذیری خیلی زیاد تهیه گردید (شکل ۹).

جدول ۳- میزان آسیب پذیری کل زیرساخت ها

Table 3- The vulnerability of the entire facility

ردیف	میزان آسیب پذیری	مساحت (مترمربع)	درصد
Row	Vulnerability level	Area (m ²)	Percent
۱	آسیب پذیری خیلی زیاد Very high vulnerability	484916	9/66/.
۲	آسیب پذیری زیاد High vulnerability	1431074/44	28/51/.
۳	آسیب پذیری متوسط Moderate vulnerability	1755639	34/98/.
۴	آسیب پذیری کم Low vulnerability	1211475/50	24/13/.
۵	آسیب پذیری خیلی کم Very low vulnerability	135633/50	2/70/.

جدول ۳ نشان می دهد که ۹/۶۶٪ و ۲۸/۵۱٪ از زیرساخت های روبنایی در پهنه ی آسیب پذیری خیلی زیاد و زیاد قرار گرفته اند و در مجموع ۳۸/۱۷٪ از زیرساخت های روبنایی در معرض آسیب پذیری زیاد و خیلی زیاد قرار دارند.

جدول ۴- میزان آسیب پذیری به تفکیک هر زیرساخت

Table 4-The level of vulnerability of each facility

ردیف	نوع کاربری	مساحت (مترمربع)	درصد
Row	User type	Area (m ²)	Percent
۱	اداری Administrative	756294/44	39/47٪
۲	تجاری Commercial	245043	12/78٪
۳	آموزشی Educational	225770	11/78٪
۴	فضای سبز Green space	192401	10/04٪
۵	انتظامی Military	181044	9/44٪
۶	ورزشی Sports	87103	4/54٪
۷	تاریخی Historical	70449	3/67٪
۸	صنعتی Industrial	66355	3/46٪
۹	بهداشتی درمانی Healthcare-Medicine	37459	1/95٪
۱۰	تفریحی گردشگری Recreational-Tourism	30500	1/59٪
۱۱	مذهبی Religious	16243	0/84٪
۱۲	فرهنگی Cultural	7329	0/38٪

با استفاده از درصد و مساحت کل زیرساخت های روبنایی در معرض آسیب پذیری سیل (جدول ۳) و با در نظر گرفتن مساحت هر زیرساخت، میزان آسیب پذیری هر زیرساخت به تفکیک محاسبه شد. براساس جدول ۴ می توان نتیجه گرفت که کاربری های اداری، تجاری و آموزشی با ۳۹/۴۷٪، ۱۲/۷۸٪ و ۱۱/۷۸٪ بیشترین آسیب پذیری و همینطور کاربری های مذهبی و فرهنگی به ترتیب با ۰/۸۴٪ و ۰/۳۸٪ کمترین حد از آسیب پذیری را نسبت به سایر کاربری ها در برابر سیل دارند، که لازم است توجه ویژه ای به زیرساخت ها در جهت به حداقل رساندن آسیب پذیری ها شود.

نتیجه گیری

سیل یکی از رایج ترین انواع بلایای طبیعی و یک تهدید جدی زیست محیطی برای مناطق شهری در سراسر جهان است، اثرات بالقوه سیل، مانند تلفات انسانی، آسیب های زیرساختی و مشکلات اقتصادی نشان می دهد که لازم است مناطق شهری اقدامات پیشگیرانه را برای کاهش آسیب پذیری در برابر چنین بلایایی و محافظت از ساکنان خود انجام دهند (Birkmann, Welle, Solecki, Lwasa & Garschagen, 2016). شناسایی مناطق مستعد سیل به منظور جابجایی جوامع و زیرساخت ها یکی از استراتژی های بالقوه کارشناسان شهری است (Dottori, Mentaschi, Bianchi, Alfieri & Feyen, 2023). شهر خرم آباد به دلیل موقعیت دره ای بودن شهر، بارش های فراوان، وجود دو رودخانه خرم رود و کرگانه در شهر، دستکاری در حریم و بستر رودخانه ها و

وجود زیرساخت‌ها در حریم رودخانه، از شهرهای مستعد آسیب پذیری سیل است. بدین منظور در این مقاله به تحلیل آسیب پذیری زیرساخت‌های روبنایی شهر خرم آباد در برابر سیل و سپس به تشریح کاربرد روش ترکیبی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و مدل فازی پرداخته شد. در این راستا، ۱۲ معیار شامل: بافت فرسوده، تراکم جمعیت، شبکه معابر، کاربری، ارتفاع، شیب، جهت شیب، زمین شناسی، فاصله از رودخانه، خاک‌شناسی، فرونشست زمین و میزان بارندگی در این پژوهش بکارگیری شد و مطابق روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، مقایسه زوجی بین این معیارها انجام و وزن دهی شدند سپس نقشه‌های این معیارها با استفاده از مدل منطق فازی استانداردسازی شدند و همپوشانی نقشه‌های لایه اطلاعاتی معیارها، در نرم افزار Arc Gis نقشه پهنه‌بندی شده سیل خیزی تهیه شد که با همپوشانی نقشه پهنه‌بندی شده با نقشه‌ی پراکنش زیرساخت‌های روبنایی، نقشه نهایی آسیب پذیری زیرساخت‌های روبنایی شهر خرم آباد تهیه گردید. نتایج تحلیل‌های انجام شده حاکی از ۳۸/۱۷٪ از زیرساخت‌های روبنایی در معرض آسیب پذیری زیاد و خیلی زیاد می باشد و کاربریهای اداری، تجاری، آموزشی با ۳۹/۴۷٪، ۱۲/۷۸٪ و ۱۱/۷۸٪ بیشترین آسیب‌پذیری و همینطور کاربری‌های مذهبی و فرهنگی به ترتیب با ۰/۸۴٪ و ۰/۳۸٪ کمترین حد از آسیب‌پذیری را نسبت به بقیه کاربری‌ها در برابر سیل دارند. در راستای کاهش آسیب پذیری‌ها به ویژه کاهش آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها در برابر سیل می‌توان پیشنهادهایی از جمله: ارتقاء کیفیت کالبدی زیرساخت‌ها و ساختمان‌ها و استفاده از مصالح جدید سبک و مقاوم در برابر سیلابی، ساماندهی و ارتقاء کیفیت بستر و حریم رودخانه‌ها و وضعیت زهکشی‌ها و رواناب‌ها و درنهایت استفاده از فناوری‌های هوشمند، پیشرفته و هوش مصنوعی جهت پیش‌بینی و هشدار سیل در جهت کاهش آسیب پذیری‌ها ارائه داد.

در نهایت برای تحقق اهداف پژوهش در راستای تشریح کاربرد روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی، می‌توان به دیگر کاربردهای این روش در جهت کاهش آسیب پذیری‌ها به مواردی از جمله: شناسایی پهنه‌ها و مناطق مستعد آسیب پذیری بحران‌ها، مکانیابی صحیح خدمات اضطراری جهت خدمات رسانی در زمان بحران، شناسایی و تحلیل گره‌های ترافیکی در مواقع بحرانی و مسیریابی صحیح به منظور گریز افراد از بحران و خدمات رسانی سریع به مردم، شناسایی و ارزیابی بافت‌های فرسوده و آسیب پذیر در زمان بحران‌ها مکانیابی و شناسایی محل اسکان موقت، پارکینگ‌ها و پناهگاه‌های امن در زمان وقوع بحران‌ها و درنهایت به مکانیابی صحیح زیرساخت‌های شهری و مناطق مسکونی در جهت کاهش آسیب‌پذیری‌ها اشاره نمود.

در پژوهش‌های پیشین در مورد سیل شهر خرم‌آباد مانند پژوهش حیدرزاده و همکاران (Heidarizadeh, Rahimi, Zahrakar & Jodaki, 2019) فقط به بررسی علت حادثه سیل شهر خرم آباد پرداخته است. راد و همکاران (Rad et al., 2018) در پژوهشی به پهنه بندی سیل با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS به بررسی حوزه آبخیز خرم آباد پرداختند که به طور کلی شهر و روستاها، زمین‌های کشاورزی و جاده‌ها را مورد بررسی قرار دادند و همچنین شرفی (Sharafi, 2022) در پژوهش خود به بررسی نقش سیلاب‌ها در تغییر بستر رودخانه‌ها و تأثیر آن بر جوامع روستایی می پردازد. وجه تمایز پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌های انجام شده در تحلیل آسیب پذیری زیرساخت‌های روبنایی شهر خرم آباد در برابر سیل می باشد که تاکنون پژوهش‌های

انجام شده به بررسی زیرساخت های روبنایی نپرداخته اند چراکه موضوع زیرساخت ها در حوزه برنامه ریزی شهری موضوعی مهم به حساب می آید و تفاوت دیگر این پژوهش با سایر پژوهش های انجام شده، استفاده از روش ترکیبی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی می باشد و کاربردهای این روش در مخاطرات و بحران ها بیان گردید.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

از خانم دکتر مهین نسترن استاد راهنمای پایان نامه خود، به خاطر بازبینی متن مقاله و ارائه نظرهای ساختاری تشکر و قدردانی می کنم. این مقاله برگرفته شده از پایان نامه کارشناسی ارشد رشته برنامه ریزی شهری دانشگاه هنر اصفهان، با عنوان «سنجش آسیب پذیری زیرساخت های شهری درمواجهه با بحران سیل با رویکرد مدیریت بحران» با نگارش نویسنده اول و به راهنمایی نویسنده دوم می باشد.

References

- Aghaei, S., & Maziar, M. (2007). Logical decision making using Expert Choice software. *Arkan Danesh Publications*. <https://arkan-danesh.com>
- Arulbalaji, P., Padmalal, D., & Sreelash, K. (2019). GIS and AHP Techniques Based Delineation of Groundwater Potential Zones: a case study from Southern Western Ghats, India. *Scientific Reports*, 9(1),2086, 2045-2322. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38567-x>
- Azarmehr, A., & khosh niyat, M. (2021). Flood Vulnerability Assessment Using Analytic Hierarchy Process (AHP). Case Study: District 6 of Tehran Municipality. *The 7th Annual International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development*. [In Persian] <https://civilica.com/doc/1373853/>
- Birkmann, J., Welle, T., Solecki, W., Lwasa, S., & Garschagen, M. (2016). Boost resilience of small and mid-sized cities. *Nature Journal*, 537(7622), 605-608. <https://doi.org/10.1038/537605a>
- Dano, U., Balogun, A.-L., Matori, A.-N., Yusouf, K., Abubakar, I., Said Mohamed, M., . . . Pradhan, B. (2019). Flood Susceptibility Mapping Using GIS-Based Analytic Network Process: A Case Study of Perlis, Malaysia. *Water Journal*, 11(3),615,. <https://doi.org/10.3390/w11030615>
- Dottori, F., Mentaschi, L., Bianchi, A., Alfieri, L., & Feyen, L. (2023). Cost-effective adaptation strategies to rising river flood risk in Europe. *Nature Climate Change*, 13(2), 196-202. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01540-0>
- Dutta, P., & Deka, S. (2024). A Novel Approach to Flood Risk Assessment: Synergizing with Geospatial based MCDM-AHP Model, Multicollinearity, and Sensitivity Analysis in the

- Lower Brahmaputra Floodplain, Assam. *Journal of Cleaner Production*, 467, 142985. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142985>
- Ekmekcioglu, O., Koc, K., & Ozger, M. (2021). District based flood risk assessment in Istanbul using fuzzy analytical hierarchy process. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 35(2), 617-637. <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01924-8>
- Esmaeili Alavijeh, E., Karimi, S., & Alavipoor, F. (2016). Vulnerability Assessment in Urban Areas against Flood with Fuzzy Logic (case study: Tehran District 22). *Environmental Science and Technology*, 22(3), 349-361. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jest.2020.10940>
- Gacu, J., Monjardin, C., Senoro, D., & Tan, F. (2022). Flood Risk Assessment Using GIS-Based Analytical Hierarchy Process in the Municipality of Odiongan, Romblon, Philippines. *Natural-Hazards Risk Assessment for Disaster Mitigation*, 12(19), 9456. <https://doi.org/10.3390/app12199456>
- General Population and Housing Census. (2016). Statistical Center of Iran. <https://amar.org.ir/population-and-housing-census#app3146>
- Ghodsipour, S. (2019). Analytical Hierarchy Process (AHP). *Amirkabir University of Technology*. [In Persian] <http://publication.aut.ac.ir/fa/book>
- Heidarizadeh, K., Rahimi, S., Zahrakar, N., & Jodaki, R. (2019). Investigation of the flood incident in Khorramabad city. *9th International Congress on Health in Accidents and Disasters*. [In Persian] <https://civilica.com/doc/929493/>
- Iranian Red Crescent Society. (2019). Khorramabad: Tabnak Report. <https://www.tabnak.ir/fa/news/889243>
- Khorramabad city comprehensive plan. (2020). Detailed plan of Khorramabad city. Retrieved from Khorramabad Municipality. <http://khorramabad.ir>
- Malik, S., Chandra Pal, S., Chowdhuri, I., Chakraborty, R., Roy, P., & Das, B. (2022). Prediction of highly flood prone areas by GIS based heuristic and statistical model in a monsoon dominated region of Bengal Basin. *Society and Environment*, 19:100343. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100343>
- Mokhtari Hashi, H., & Rahimi, D. (2016). Zoning of Flood risk in Human and Economic activities centers of South Khorasan Province using the Fuzzy Logic System. *Geography and Environmental Planning*, 27(1), 199-216. [In Persian] <https://doi.org/10.22108/gep.2016.21366>
- Rad, M., Vafakhah, M., & Gholamali Fard, M. (2018). Flood mapping using HEC-RAS hydraulic model in part of Khorramabad watershed. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 7(16), 211-226. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/jneh.2017.3343>
- Rezaei Rashno, T., & Haghzad, A. (2015). Urban Planning and Natural Disaster Crisis Management (Floods) Case Study: Khorramabad City. In *The First International Conference on Geographical Sciences*. [In Persian] <https://civilica.com/doc/562117>
- Salehi, E., Rafie, Y., Farzadbehtash, M., & Agha Babaei, M. (2013). Urban Flood Hazard Zonation Using GIS and Fuzzy-Ahp Analysis Case Study: Tehran City. *Journal of*

- Environmental Studies*, 39(3), 179-188. [In Persian]
<https://doi.org/10.22059/jes.2013.35901>
- Saucedo, J., Salais, T., Aguilar, R., & Marmolejo-Sa, J. (2024). Selecting the Distribution System using AHP and Fuzzy AHP Methods. *Mobile Networks and Applications*, 29(1), 235-242. <https://doi.org/10.1007/s11036-023-02290-9>
- Servati, M. R., Ahmadi, M., Nosrati, K., & Mezbani, M. (2013). Flood Potential Zonation In Sarab Of DarrehShahr Drainage Basin. *Journal Geography*, 11(36), 55-77. [In Persian]
<https://sid.ir/paper/150395/fa>
- Shaluf, I. (2007). An overview on disasters Disaster Prevention and Management. *International Journal*, 16(5), 687-703. <https://doi.org/10.1108/09653560710837000>
- Sharafi, S. (2022). Assessing the Role of Floods in Changing the Bed of Rivers and its Impact on Rural Communities (Case study: Khorramabad River). *Geography and Development*, 19(65), 127-152. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.22111/J10.22111.2021.6521>
- Sheikh Alishahi, N., Jamali, A., & Hassanzadeh Nafouti, M. (2016). Flood Zoning Using a River Analysis Hydraulic Model (Case Study: Manshad Watershed - Yazd Province). *Geographic Space Journal*, 16(53), 77-96. [In Persian] <http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-2350-fa.html>
- Vejdani Nozar, A., & Givvehchi, S. (2022). Presenting a flood risk assessment model in Hamedan Province to classify vulnerability and possible consequences in population centers. *Housing and the Rural Environment*, 42(181), 119-132. [In Persian]
<https://doi.org/10.22034/42.181.119>
- Xiong, J., Wang, Z., Guo, S., Wu, X., Yin, J., Wang, J., ... & Gong, Q. (2022). High effectiveness of GRACE data in daily-scale flood modeling: case study in the Xijiang River Basin, China. *Natural Hazards*, 113(24), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05312-z>
- Yang, X. I., Ding, J. H., & Hou, H. (2013). Application of a triangular fuzzy AHP approach for flood risk evaluation and response measures analysis. *Natural Hazards*, 68, 657-674. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0642-x>
- Zebardast, E. (2011). Application of Analytic Hierarchy Process in Urban and Regional Planning. *Journal of Fine Arts: Architecture and Urban Planning*, 10, 14-20. [In Persian]
<https://doi.org/20.1001.1.22286020.1389.2.41.7.4>
- Ziari, K., Rajai, S., & Darabkhani, R. (2020). Flood Zoning Using Hierarchical Analysis and Fuzzy Logic in GIS Case Study: Ilam City. *Crisis Management*, 10(1). [In Persian]
<https://doi.org/20.1001.1.23453915.1400.10.1.2.2>



Evaluation of Semi-distributed (SWAT) and Lumped (SMAR) Hydrological Models in Rainfall-runoff Estimation and Simulation, Case Study: Ojan chay drainage basin

Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam^{a*}, Fariba Karami^b, Kolsom Abazari^c

^a Professor in Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

^b Professor in Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

^c PhD in Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

ARTICLE INFO

ARTICLE HISTORY

Received :30 November 2023

Received in revised form:
30 March 2024

Accepted :19 April 2024

Available online :
21 March 2025

Keywords:

RUNOFF SIMULATION,
SWAT MODEL, SMAR
MODEL, SUFI-2
ALGORITHM, NASH-
SUTCLIFFE
EFFICIENCY,
COEFFICIENT OF
DETERMINATION (R^2),
OJAN CHAY BASIN,
HYDROLOGICAL
MODELING

ABSTRACT

One of the most important solutions for the principled and correct management of water and soil in basins is to use hydrological models for simulation of rainfall-runoff processes, which estimate and predict the components of the water balance, including runoff, evaporation, transpiration, and infiltration, especially in basins without data or with incomplete data. In this study, the water balance of Ojan Chai basin was simulated by the SWAT semi-distributed and SMAR models for 20 years (2002-2021). The SUFI-2 algorithm was used in the SWAT model and the genetic algorithm optimizer was used in the SMAR model for calibration (2005 to 2016) and validation (2017 to 2021).

The simulation results in the calibration phase with the objective functions of the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), coefficient of determination (R^2), and RSR were equal to 0.80, 0.81, and 0.45, respectively, and for validation, 0.74, 0.75, and 0.51, respectively, which indicates the high efficiency of the model in simulating the water balance. For the SMAR method, the Nash-Sutcliffe coefficients (NSE) and R^2 were obtained as 0.60 and 0.56 in calibration and 0.625 and 0.67 in validation.

Both of these models perform better in simulating the baseflow and average flow rates than the maximum flow rates; however, the matching of the simulated flow rate with the observed flow rate in the SWAT model is superior to that of the SMAR model, which is due to the consideration of spatial changes in this type of model. Considering the very good performance results of the models, it is suggested that they be used in watershed protection measures and water and soil management.

*Corresponding author :Dr.Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam

E-mail address: Rezmogh@tabrizu.ac.ir

How to cite this article: Rezaei Moghaddam, M. H., Karami, F., & Abazari, K. (2025). Evaluation of Semi-distributed (SWAT) and Lumped (SMAR) Hydrological Models in Rainfall-runoff Estimation and Simulation, Case Study: Ojan chay drainage basin. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), pp.123-150, DOI:https://doi.org/10.22067/geoh.2024.85638.1436



©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

One of the most fundamental natural processes of basins is the hydrological process. Estimating and predicting hydrological balance components, including runoff, evapotranspiration, and infiltration, are important in basins. Protecting water and soil resources is an important strategy for managing basins. Hydrological models are one strategy used to simulate rainfall-runoff processes. Rainfall-runoff models can interpolate and extrapolate flow according to the input data to the model. Hydrological models can be classified into lumped, semi-distributed, and distributed types because of differences in basin simulation structure. Among the lumped models, we can mention the RRL software model series, which includes AWBM, SIMHYD, TANK, SMAR, and SACRAMENTO, and the SWAT model is the semi-distributed model with the highest usage. The Ojan Chay basin, located in Bostanabad County (East Azerbaijan Province), is one of the main sub-basins of the Aji Chay River. Due to its topographic features, semi-arid climate, and soil type, it is one of the important pastures of the Sahand Mountains and the location of various rainfed and irrigated crops. The purpose of this study is to evaluate and simulate rainfall-runoff over 20 years by using the lumped SMAR model and the semi-distributed SWAT model.

Material and Methods

The data required for this study includes topographic maps, soil maps, 30-meter DEM images, and land use maps. Rainfall data was extracted from Bostanabad, Bashsiz-Ojan, Saeedabad, Zarnak, Saray, Ghoshchi, Zinjanab, and Hashtrood weather stations. Synoptic stations in Bostanabad, Ahar, Sarab, Sahand, Mianeh, and Maragheh were used to extract minimum temperature, maximum temperature, wind speed, relative humidity, and evapotranspiration. Calibration and validation of the models were achieved by using discharge data from Bostanabad station during the period 2002-2021. SWAT and SMAR models were utilized in this study. In the SWAT model, the basin was first divided into sub-basins and hydrological response units (HRUs) by using DEM image, land use, slope, and soil maps, and data from weather stations in ArcMap environment. The SWAT-CUP software was utilized to simulate rainfall-runoff by extracting the model output. The SMAR model requires less input data than SWAT. In this model, monthly rainfall and evapotranspiration data from synoptic stations, as well as monthly discharge data from the Bostanabad hydrometric station, were entered. Genetic algorithm and related parameters were used to simulate rainfall-runoff. To evaluate the efficiency and accuracy of these models in the calibration and validation, the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), coefficient of determination (R^2), and ratio of standard deviation of observations to root mean square error (RSR) were used.

Results and Discussion

Land use, slope, and soil were used to extract 13 sub-basins and 157 hydrological response units in the SWAT model. The model output was entered into SWAT-CUP software. The warm-up period was defined as the first 3 years of the statistical period 2002-2021. To determine the sensitivity of the parameters that affect runoff, the SUFI-2 algorithm was used. Sensitivity analysis was carried out for 26 parameters in the statistical period from 2005 to 2016 through monthly discharge data of the Bostanabad

hydrometric station. According to the results, out of the 26 selected parameters, only 12 parameters were sensitive and effective and were included in the model with the range of their changes. The model was calibrated by using the new optimal values of the parameters for the statistical period 2005 to 2016 at monthly time scale to obtain the best values of the objective functions. By applying the optimized parameters in the calibration, Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), coefficient of determination (R^2), and ratio of standard deviation of observations to root mean square error (RSR) were obtained as 0.80, 0.81, and 0.45, respectively. The results in the calibration were in a very good range. For the validation, monthly discharge data during 2017 to 2021 were entered into the model. The Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), coefficient of determination (R^2), and RSR were 0.74, 0.75, and 0.51, respectively, which indicate the ability of the SWAT hydrological model to simulate the discharge of the Ojan Chay basin. In the SMAR model, monthly rainfall and evapotranspiration data from synoptic stations and monthly discharge data from Bostanabad hydrometric station were entered into the model according to the software format. Genetic algorithm and parameters related to water balance and flow routing were used to simulate rainfall-runoff. The model was calibrated in the statistical period 2005-2016 and validated in the statistical period 2017-2021, and the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) and coefficient of determination (R^2) were considered to evaluate the performance of the SMAR model. The Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) and coefficient of determination (R^2) in calibration (0.60 and 0.56) and validation (0.625 and 0.67) indicate the acceptable performance of the SMAR model. Like the SWAT model, the SMAR model has simulated the base and average discharge values well, but it has not simulated the maximum discharges well.

Conclusion

In this study, the physical and semi-distributed SWAT model and the lumped SMAR model were used to simulate the runoff of the Ojan Chay drainage basin over a 20-year period. The performance of the hydrological models was evaluated by Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), coefficient of determination (R^2), and ratio of standard deviation of observations to root mean square error (RSR) during the calibration and validation periods. The results showed that both models performed well in average and base discharges. One of the weaknesses of both models was the inappropriate estimation of peak discharges and extreme events. The lack of required data (rainfall, minimum and maximum temperature, relative humidity, wind speed, etc.), the lack of proper data recording by the relevant organization, the need for a large amount of data in SWAT, etc. are all the reasons that reduce the accuracy of these models. Generally, it can be said that although both models have good evaluation in runoff simulation during the calibration and validation periods, the performance of the SWAT model shows its superiority over the SMAR model, due to the high values of the Nash-Sutcliffe efficiency and R^2 in both calibration and validation.



ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی نیمه‌توزیعی (SWAT) و یکپارچه (SMAR) در برآورد و شبیه‌سازی بارش-رواناب، مطالعه موردی: حوضه آبریز اوجان‌چای

محمدحسین رضایی مقدم^{۱*}، فریبا کرمی^۲، کلثوم اباذری^۳

^۱استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۳دانش آموخته مقطع دکترای ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۹/۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱/۳۱	یکی از راهکارهای مهم مدیریت اصولی و صحیح آب و خاک در حوضه‌های آبریز، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی فرایندهای بارش-رواناب است که تخمین و پیش‌بینی مولفه‌های بیلان آبی از جمله رواناب، تبخیر و تعرق و نفوذ را خصوصا در حوضه‌های فاقد آمار یا دارای آمار ناقص امکان‌پذیر می‌کند. در این پژوهش بیلان آبی حوضه آبریز اوجان‌چای در طی دوره ۲۰ ساله (۲۰۰۲-۲۰۲۱) با استفاده از مدل نیمه‌توزیعی SWAT و مدل یکپارچه SMAR شبیه‌سازی شد. در مدل SWAT از الگوریتم SUFI-2 و در مدل SMAR از بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک، جهت واسنجی (۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶) و اعتبارسنجی (۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱) بهره گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی SWAT در مرحله واسنجی با توابع هدف ضرایب نش‌ساتکلیف R^2، (NSE) و RSR به ترتیب برابر با ۰/۸۰، ۰/۸۱ و ۰/۴۵ و برای اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۷۵ و ۰/۵۱ به دست آمد که نشان‌دهنده کارایی بالایی مدل در شبیه‌سازی بیلان آبی حوضه آبریز است و در روش SMAR ضرایب نش‌ساتکلیف R^2، (NSE) در واسنجی ۰/۶۰، ۰/۵۶ و در اعتبارسنجی ۰/۶۲۵، ۰/۶۷ بدست آمد. هر دوی این روش‌ها در شبیه‌سازی دبی‌های پایه و متوسط نسبت به دبی‌های حداکثری عملکرد بهتری دارند ولی با این حال تطابق دبی شبیه‌سازی شده با دبی مشاهداتی در مدل SWAT نسبت به SMAR برتری دارد که علت آن در نظر گرفتن تغییرات مکانی در این نوع از مدل‌ها است. لذا با توجه به نتایج خیلی خوب کارایی مدل‌ها، پیشنهاد می‌شود از آن در اقدامات حفاظتی حوضه‌ها و مدیریت آب و خاک استفاده شود.
کلمات کلیدی: شبیه‌سازی رواناب مدل SWAT مدل SMAR الگوریتم SUFI-2 کارایی نش-ساتکلیف ضریب تعیین (R^2) حوضه آبریز اوجان‌چای مدل‌سازی هیدرولوژیکی	

مقدمه

فرآیندهای هیدرولوژیکی یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین فرآیندهای طبیعی هر حوضه آبریز است (Mansouri & Pirmoradian, 2019). شناسایی و به مدل درآوردن رفتار رودها و شریان‌های آبی جهت برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و استفاده بیشتر و بهتر از پتانسیل‌های آن عمیقاً احساس می‌شود. بطوریکه عدم وجود تشکیلات منسجم به منظور ثبت تغییرات سیستم هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز کشور، قرار گرفتن بیشتر رودها در مناطق خشک و نیمه‌خشک، وضعیت بحرانی برداشت آب‌های زیرزمینی و لزوم توجه بیشتر به آب‌های سطحی، همه و همه دلایل بیشتر و ظریف‌تری می‌باشد که به مقوله شبیه‌سازی و پیش‌بینی، جلوه و نمودی کامل‌تر می‌بخشد (Karami, Bayati khatibi & Ganbari, 2016). تخمین و پیش‌بینی مولفه‌های بیلان هیدرولوژیکی از جمله رواناب، تبخیر و تعرق و نفوذ در حوضه‌های آبریز از اهمیت زیادی برخوردار است (Shafiei & Gharari, 2018).

با توجه به شرایط موجود در بسیاری از حوضه‌های آبریز کشور از لحاظ کمبود آمار، پیچیدگی زیاد اکوسیستم‌های هیدرولوژیکی و عدم امکان شناخت کامل آن‌ها استفاده از روش‌هایی که بتوان به کمک آن‌ها میزان رواناب حاصل از بارندگی را در حوضه‌های فاقد آمار یا دارای آمار ناقص تخمین زد، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است (Fazeli Thani, Motamed Vaziri & Gaderi, 2016) و حفاظت از منابع آب و خاک از جمله راهکارهای مهم مدیریت اصولی و صحیح حوضه‌های آبریز است (Rezaei Mogadam, Hejazi & Behbody, 2018).

یکی از این راهکارها، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی فرآیندهای بارش-رواناب است. مدل‌های بارش-رواناب قابلیت درون‌یابی و برون‌یابی جریان را متناسب با داده‌های ورودی به مدل را دارند (Memgistu, 2009). مدل‌های زیادی برای شرح و پیش‌بینی هیدرولوژی حوضه آبریز پیشنهاد شده‌است که از نظر اهداف و مقیاس زمانی و مکانی بسیار متفاوت هستند (Setegn, Dargahi, Srinivasan & Melesse, 2010). مدل‌های هیدرولوژیکی براساس تفاوت در ساختار شبیه‌سازی حوضه آبریز به انواع یکپارچه، نیمه‌توزیعی و توزیعی تقسیم می‌شوند. از جمله مدل‌های یکپارچه می‌توان به سری مدل‌های نرم‌افزار RRL اشاره کرد که شامل AWBM، SIMHYD، TANK، SMAR و SACRAMENTO است و از مدل‌های نیمه‌توزیعی پرکاربرد، مدل SWAT¹ است. در رابطه با موضوع شبیه‌سازی بارش-رواناب براساس مدل‌های هیدرولوژیکی تحقیقات زیادی در سطح ایران و جهان صورت گرفته‌است از جمله: رستمی خلیج و همکاران (Rostami Khalaj, 2016) (Moghadamnia, Salmani & Sepahvand, 2016) در بررسی مقایسه‌ای مدل‌های SIMHYD، TANK، AWBM، SACRAMENTO و SMAR در حوضه آبریز نوده نشان دادند که مدل AWBM نسبت به سایرین در واسنجی و اعتبارسنجی رواناب کارایی بهتری دارد.

رشیدی و همکاران (Rashidi, Araghinrad & Ebrahimi, 2017) در شبیه‌سازی رواناب در شمال استان مرکزی با استفاده از مدل‌های WAPABA و SALAS به این نتیجه رسیدند که مدل WAPABA عملکرد بهتری در برآورد رواناب داشته است که علت آن در نظر گرفتن وزن‌های یکسان برای همه پارامترها است. شبیه‌سازی رواناب حوضه آبریز گاماسیاب توسط زارع‌زاده مهریزی و همکاران (Zarezade Mehrizi, Koorani, 2017) نشان داد که براساس نتایج نش‌ساتکلیف و R^2 در واسنجی و اعتبار سنجی، مدل SWAT توانسته شبیه‌سازی خوبی را ارائه دهد. شیخ‌گودرزی و همکاران (Shikh Gooderzi, 2018) در شبیه‌سازی دبی حوضه بابلرود با مقایسه روش‌های WBM، SIMHYD و Tank دریافتند که شبیه‌سازی در هر سه مدل در دبی‌های متوسط و حداکثری انطباق قابل قبولی داشته‌اند. مقایسه کارایی مدل‌های SIMHYD، AWBM، شبکه‌عصبی (MLP و RBF) در شبیه‌سازی رواناب حوضه بار اریه نیشابور توسط دستجردی و همکاران (Dastjerdi, Azarakhshi & Bashiri, 2019)، مطالعه دیگری است که نشان می‌دهد، روش SIMHYD در واسنجی و اعتبارسنجی رواناب، ضرایب آماری (نش‌ساتکلیف، تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا) بهتری را ارائه کرده است. برآورد میزان رواناب حوضه آبریز لنبران‌چای توسط رضایی‌مقدم و همکاران (Rezaei Mogadam et al., 2018) نشان داد، الگوریتم SUFI-2 نسبت به GLUE در واسنجی و تعیین عدم قطعیت مدل برتر است. روستایی و همکاران (Roostaei, Ayaseh, 2020) در شبیه‌سازی دوبعدی جریان سیلابی رودخانه ليقوان با مدل Mike 11 به این نتیجه رسیدند که افزایش یا کاهش پوشش گیاهی بر ویژگی‌های جریان از نظر سرعت و عمق تاثیر معناداری دارد. سرایی و همکاران (Saraie, Talebi, Mazidi & Parvizi, 2020) در اولویت‌بندی حوضه آبریز سردآبرود از نظر تولید رواناب به روش SWAT نشان دادند که تولید رواناب و احتمال وقوع سیلاب در زیرحوضه‌های ۶، ۲۳، ۵، ۱۰ (با مرتع متوسط تا فقیر و مناطق مسکونی حاشیه رودخانه‌ها) بالاست. خاوریان و همکاران (Khavarian, 2020) با استفاده از مدل Temez و تاثیر سناریوهای مختلف بر کاربری اراضی در حوضه آبریز کوزه‌تپراقی نشان دادند که احداث باغ در مراتع شخم‌خورده و کم‌بازده کاهش رواناب و تبدیل مراتع پرشیب به زراعت دیم، افزایش رواناب را در پی خواهد داشت. رضایی‌مقدم و همکاران (Rezaei Moghadam, Mokhtari, 2021) در شبیه‌سازی رواناب و رسوب حوضه آبریز شهرچای میانه با در نظر گرفتن ضرایب آماری NSE و R^2 نشان دادند که الگوریتم SUFI-2 در شبیه‌سازی رواناب نسبت به رسوب عملکرد بهتری دارد. پرواز و شاهویی (Parvaz & Shahoei, 2022) در حوضه دریاچه ارومیه با مدل AWBM به این نتیجه رسیدند که در بازه زمانی مورد نظر بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده انطباق بالایی وجود دارد که نشانگر قابلیت خوب مدل در پیش‌بینی رواناب منطقه است. رضوانی و همکاران (Rezvani, Ghorbani, 2023) با مقایسه مدل‌های SMAR، SIMHYD و SACRAMENTO در شبیه‌سازی رواناب در حوضه گالیکش استان گلستان دریافتند که مدل SACRAMENTO با ضریب بالای نش‌ساتکلیف در واسنجی و اعتبارسنجی شبیه‌سازی بهتری از رواناب را ارائه داده است. آرخی و همکاران (Arekhi, karkaz & Emadodin, 2023) با استفاده از مدل SWAT در بررسی

تأثیر تغییرات اقلیمی در حوضه قره‌سو دریافتند که تغییرات اقلیمی باعث افزایش متوسط دبی سالانه و دبی‌های حداکثری و متعاقباً جریان‌های سیلابی شده‌است. لین و همکاران (Lin et al., 2015) در تحلیل تأثیرات کاربری اراضی بر رواناب در حوضه آبریز جین جیانگ^۱ در چین به این نتیجه رسیدند که افزایش مناطق شهری و جنگل‌زدایی از ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۶ باعث افزایش میزان رواناب شده‌است. کافاس و همکاران (Kaffas, Hrissanthou & Sevatas, 2018) در ارزیابی فرآیندهای هیدرومورفولوژیکی در حوضه کوهستانی نستوس^۲ شمال شرقی یونان با بکارگیری مدل ریاضی و SWAT نشان دادند که نمودار رواناب شبیه‌سازی شده هر دو مدل، الگوی مشابه و نزدیک به هم را دارند. سانگ و همکاران (Song, Shi, Yao & Zhang, 2019) در ارزیابی مقایسه‌ای عملکرد مدل‌های SMAR، SACRAMENTO و TANK در چین به این نتیجه رسیدند که هر سه روش با ارائه ضرایب آماری بالا عملکرد خوبی در شبیه‌سازی رواناب دارند. احمدی و همکاران (Ahmadi, Moeini, Ahmadi, Motamedvaziri & Zehtabiyan, 2019) در شبیه‌سازی بارش-رواناب در ایران از طریق مقایسه تطبیقی مدل‌های SWAT، IHECRAS و ANN نشان دادند که عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی خوب بوده و مدل SWAT نسبت به IHECRAS عملکرد بهتری داشته‌است. لو و همکاران (Lv, Zuo & Rodriguz, 2020) در شبیه‌سازی و پیش‌بینی رواناب با استفاده از مدل‌های SWAT-ANN و SWAT-MLP/WOA در حوضه بالیقلوچای (ایران) دریافتند که مدل SWAT-MLP/WOA از نظر شاخص‌های آماری نش-ساتکلیف، R^2 ، RMSE و RE عملکرد بهتری دارد. فرریرا و همکاران (Ferreira et al., 2021) در ارزیابی رواناب در برزیل نشان دادند که مدل SWAT توانایی بیشتری برای مدیریت و پیش‌بینی آینده سیستم هیدرولوژیکی نسبت به HEC-HMS دارد. گو و همکاران (Guo et al., 2022) با روش‌های مختلف درون‌یابی بارش و مدل‌های GR4J، IHACRES، MIK SHE و SACRAMENTO در حوضه چائوه^۳ در چین نشان دادند که روش درون‌یابی ANUSPLIN و SACRAMENTO ارزیابی بهتری از شبیه‌سازی رواناب را دارند. رضانی و همکاران (Ramezani, Helfer & Yu, 2023) با استفاده از مدل SIMHYD تأثیرات شهرسازی و تغییرات اقلیمی بر رواناب را در استرالیا بررسی کردند و نتایج حاصل از ضرایب نش-ساتکلیف و مقدار مطلق خطا در واسنجی و اعتبارسنجی رواناب شبیه‌سازی شده، رضایت‌بخش به‌دست آمد. ردی و همکاران (Reddy, Saravanan & Abijith, 2023) در زیرحوضه هم‌اواتی در هند با بکارگیری مدل‌های AWBM، SACRAMENTO و شبکه عصبی FFBPNN شبیه‌سازی رواناب برای دوره ۲۵ ساله را انجام دادند. نتایج ضریب نش-ساتکلیف و ضریب همبستگی در FFBPNN و AWBM نسبت به SACRAMENTO از نظر واسنجی و اعتبارسنجی عملکرد خوبی دارند.

حوضه آبریز اوجان‌چای واقع در شهرستان بستان‌آباد (استان آذربایجان شرقی)، یکی از زیرحوضه‌های اصلی آبی‌چای است که با توجه به ویژگی‌های توپوگرافی، اقلیم نیمه‌خشک و نوع خاک، از چراگاه‌های مهم کوهستان سهند و محل محصولات مختلف دیمی و آبی است، لذا با توجه به اهمیت این حوضه و قرارگیری ۷۱ سکونتگاه

1 Jinjiang

2 Nestos

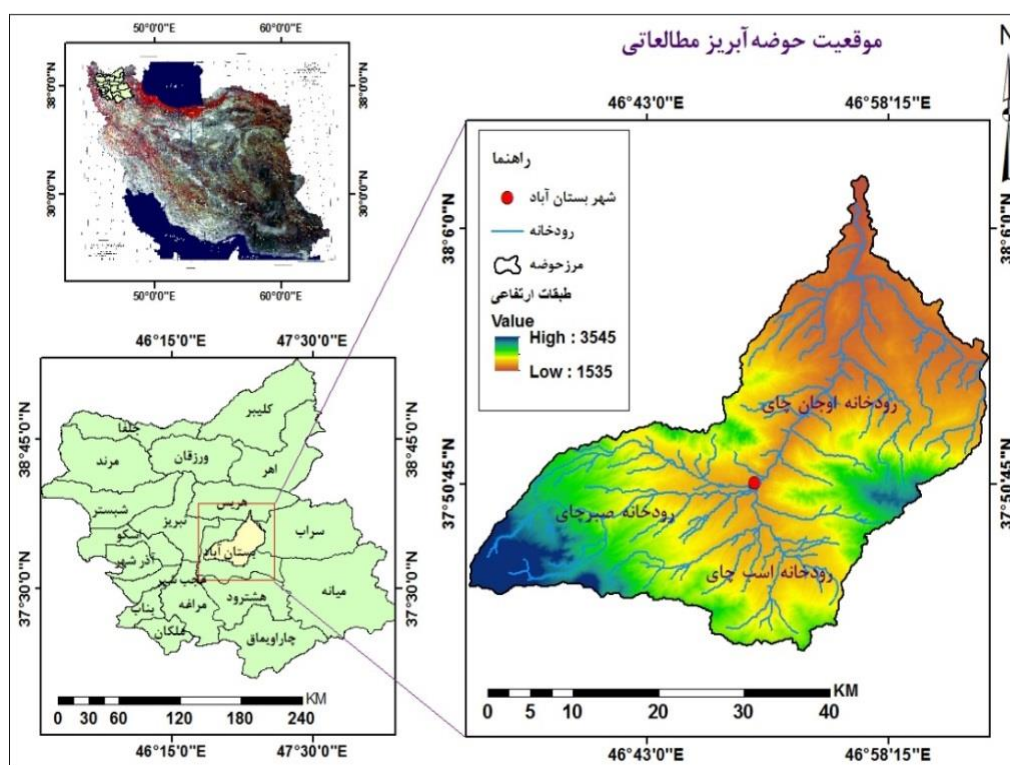
3 Chaohe

روستایی در آن، مطالعات متعددی در مورد این حوضه در رابطه با تغییرات کاربری اراضی، فرسایش و... انجام شده است و هدف پژوهش حاضر نیز ادامه این مطالعات و شبیه سازی بارش-رواناب در طی دوره ۲۰ ساله است. وجه تمایز این پژوهش با مطالعات قبلی، استفاده از مدل یکپارچه SMAR و کاربرد مقایسه‌ای مدل‌های نیمه توزیعی و یکپارچه در برآورد دبی جریان است.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

حوضه‌ی آبریز اوجان‌چای که در منطقه شمال غرب کشور و در دامنه‌های شرقی کوهستان سهند قرار گرفته، از زیر حوضه‌های مهم آبی‌چای است که در موقعیت جغرافیایی $31^{\circ} 46'$ الی $3^{\circ} 47'$ طول شرقی و $37^{\circ} 44'$ الی $5^{\circ} 38'$ عرض شمالی واقع شده است این حوضه از غرب به حوضه‌ی آبریز سعیدآباد، از شرق به شهر شریبان، از جنوب به شهرستان هشت‌رود و از شمال به شهرستان هریس منتهی می‌شود و شامل دو زیر حوضه صبرچای و اسب‌چای است که در نزدیکی شهر بستان‌آباد به رودخانه اوجان‌چای می‌پیوندند. حداکثر ارتفاع آن در بخش جنوب و جنوب غربی یعنی بزداغ با ارتفاع ۳۵۴۰ متر قرار گرفته و حداقل ارتفاع آن در محل پیوست رودخانه اوجان‌چای به آبی‌چای دیده می‌شود (شکل ۱). حوضه‌ی آبریز مطالعاتی به مساحت ۱۰۸۲ کیلومتر مربع با متوسط دمای سالانه آن ۱۳/۵ درجه سانتیگراد و میزان بارش سالانه بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی متر از نظر اقلیمی نیمه‌خشک است. در ماه‌های اردیبهشت حوضه بیشترین بارندگی را دریافت می‌کند و مرداد و تیر از خشک‌ترین ماه‌های سال محسوب می‌شوند (Bayati Khatibi & Karami, 2019b).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig.1. The study area

داده‌ها

داده‌های مورد نیاز در این پژوهش شامل نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، نقشه خاک، تصاویر DEM ۳۰ متر، نقشه کاربری اراضی است. نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ برای سال ۲۰۲۱ میلادی به روش طبقه‌بندی نظارت‌شده و ضریب کاپای ۰/۸۵ در محیط نرم افزار ENVI تهیه شد. متناسب با ورودی مورد نیاز مدل SWAT در ۸ کلاس طبقه‌بندی شد. طبق لایه خروجی، کاربری جنگل در منطقه ناچیز و آنهم بصورت جنگل دست‌کاشت، کمتر از ۱ درصد را شامل می‌شود مراتع متراکم و نیمه متراکم و کم تراکم به ترتیب با ۱۲/۱۸، ۱۶/۵۱ درصد و ۴/۹۴ درصد از حوضه را دربرگرفته‌اند. بخش مهمی از کاربری‌ها، زمین‌های زراعی هستند بطوری‌که زراعت دیم و آبی و باغات مجموعاً ۶۴ درصد از مساحت حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. از دیگر کاربری‌ها، سطوح آبی و مناطق مسکونی‌اند که عمدتاً روستاها و شهرستان‌آباد را شامل می‌شود و این مناطق ۲ درصد از مساحت حوضه را شامل می‌شود. برای استخراج داده‌های بارش از ایستگاه‌های بارانسنجی استان‌آباد، باشسیراوجان، سعیدآباد، زرنق، سرای، قوشچی، زینجناب، هشتروند استفاده شد. ایستگاه‌های سینوپتیک، استان‌آباد، اهر، سراب، سه‌پند، میانه و مراغه برای دمای حداقل، دمای حداکثر، سرعت باد، رطوبت نسبی و تبخیر و تعرق و... بکار گرفته شد و جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل از داده‌های هیدرومتری ایستگاه استان‌آباد در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۲۲ استفاده شد (جدول ۱).

جدول ۱- داده‌های مورد نیاز در مدل SWAT

Table 1-Data required in SWAT

دوره period	کاربرد Usage	توضیحات Explanations	داده Data
****	ورودی SWAT SWAT Input	سایت USGS USGS Site	مدل رقومی ارتفاعی DEM
****	ورودی SWAT SWAT Input	سایت FAO FAO Site	نقشه خاک Soil Map
2021	ورودی SWAT SWAT Input	سایت USGS (تصاویر ماهواره سنتینل ۲) USGS Site (Sentinel 2 satellite images)	نقشه کاربری اراضی Landuse Map
2002-2021	ورودی SWAT و SMAR SWAT & SMAR Input	سازمان هواشناسی National Meteorological Organization	داده‌های اقلیمی Climatic Dats
2002-2021	ورودی SWAT و SMAR SWAT & SMAR Input	سازمان آب منطقه‌ای Regional Water Company Of East Azarbaijan	داده‌های دبی Discharge data

مدل SWAT

مدل هیدرولوژیکی SWAT یک مدل بر مبنای فیزیکی و نیمه‌توزیعی که قادر به اجرا در مقیاس‌های زمانی مختلف (روزانه، ماهانه و سالانه) است و عموماً برای مدل‌سازی و پیش‌بینی رواناب، رسوب و مواد شیمیایی حاصل از کشاورزی با داده‌های ورودی در مقیاس حوضه آبریز است (Busico et al., 2020). در این مدل ابتدا حوضه آبریز به زیر حوضه‌هایی براساس نقشه‌های ارتفاعی (DEM) تقسیم و سپس با توجه به نقشه‌های خاک و کاربری اراضی به واحدهای واکنش هیدرولوژیک Hydrologic Response Unit (HRU) تقسیم می‌گردد. این مدل از روش‌های شماره منحنی اصلاح‌شده و گرین‌امپت^۱ برای تخمین رواناب سطحی استفاده می‌کند و روندیابی جریان توسط روش‌های ذخیره متغیر و ماسکینگهام^۲ قابل محاسبه است (Neitsch, Arnold, Kiniry & Williams, 2005). در مدل SWAT تبخیر از خاک و گیاه به‌طور جداگانه محاسبه می‌شود. تبخیر و تعرق پتانسیل توسط روش‌های پنمن-مونتیت^۳، پرستلی تیلور و هارگریوز-سامانی^۴ می‌تواند صورت گیرد. چرخه هیدرولوژی که به وسیله مدل SWAT شبیه‌سازی می‌شود براساس معادله (۱) بیان آب استوار است:

$$=SW_0 + \sum_i^t = 1(R_{day-Q_{surf}} + E_a - W_{seep} - Q_{qw}) SW_t \quad (1)$$

1 Soil Conservation Service & Green-Ampt

2 Muskingum

3 Monteith

4 Hargreaves & Samani

در این معادله SW_t مقدار نهایی رطوبت خاک در یک متر از عمق خاک، SW_0 مقدار رطوبت اولیه خاک، t زمان به روز، R_{day} مقدار بارش در روز Δt به میلی‌متر، Q_{surf} مقدار عمق رواناب در روز Δt به میلی‌متر، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز Δt به میلی‌متر، W_{seep} مقدار نشت به میلی‌متر که روز Δt از نیم‌رخ خاک وارد منطقه غیر اشباع می‌شود و Q_{gw} مقدار آب بازگشتی در روز Δt بر حسب میلی‌متر است (Neitsch et al., 2005). بهینه سازی پارامترها و آنالیز عدم قطعیت مدل SWAT با استفاده از الگوریتم $SUFI-2^1$ نرم‌افزار SWAT-CUP انجام شد. در روش $SUFI-2$ یک دامنه عدم قطعیت برای هر پارامتر در نظر گرفته می‌شود که در هنگام واسنجی سعی می‌شود پارامترها در این محدوده قرار گیرند که به آن دامنه عدم قطعیت ۹۵ درصد می‌گویند. از آنجایی که اثر تمام عوامل عدم قطعیت در متغیر اندازه‌گیری شده منعکس می‌شوند، P-factor معیار مناسبی برای سنجش قدرت تحلیل عدم قطعیت انجام شده، می‌باشد. عامل دیگری که در برآورد قدرت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت بکار می‌رود، d-factor است. معیار d-factor برابر با فاصله متوسط بین حد بالا و پایین در طیف ۹۵ درصد، تقسیم بر انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری شده است. شرایط ایده‌آل زمانی است که مقدار P-factor، به یک و d-factor به صفر نزدیک باشد. بعد از واسنجی، اعتبارسنجی صورت می‌گیرد. اعتبارسنجی شبیه واسنجی است که در آن داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل در یک سری زمانی متفاوت از دوره واسنجی با واقعیت مقایسه می‌گردد. تنها تفاوت آن با واسنجی این است که هیچ تصحیحی روی پارامترها صورت نمی‌گیرد. در نهایت اعتبارسنجی، اعتمادپذیر بودن مدل واسنجی شده را برای استفاده در داده‌های مستقل و بازه‌های زمانی آینده تعیین می‌کند (Karami, Bayati Khatibi & Ganbari, 2017).

SMAR

نرم‌افزار RRL^۲ با استفاده از داده‌های مشاهداتی بارش، تبخیر و تعرق و دبی مشاهداتی برای شبیه‌سازی بارش-رواناب ایجاد شده است. این نرم‌افزار حاوی پنج مدل بارش-رواناب AWBM، SIMHYD، SACRAMENTO، TANK و SMAR است. این مدل‌ها دارای ۷ مورد بهینه‌ساز به منظور واسنجی خودکار است: الگوریتم ژنتیک^۳، الگوی جست و جوی چندآغاز^۴، نمونه‌برداری تصادفی یکنواخت^۵، بهینه‌ساز با شروع چندگانه روزنبرگ^۶، تک آغاز روزنبرگ^۷، روش تکاملی به هم ریخته پیچیده^۸ و الگوی جست‌وجو^۹ است (Rezvani et al., 2023). مدل SMAR یک مدل مفهومی یکپارچه می‌باشد که رواناب سطحی، دبی آب زیرزمینی، تبخیر و تعرق و نشت از پروفیل خاک را در سطح حوضه‌آبریز تخمین می‌زند. این مدل از دو مکانیسم

1 Sequential Uncertainty Fitting Version 2

2 Rainfall Runoff Library

3 Genetic Algorithm

4 Pattern Search Multi-Start

5 Uniform Random Sampling

6 Rosenbrock Multi-Start Optimiser

7 Rosenbrock Single Start

8 Shuffled Complex Evolution Method

9 Pattern Search

تولید رواناب هورتون^۱ و هولت-هیبرت^۲ پیروی می‌کند که به ترتیب بیان می‌کند که رواناب زمانی پدید می‌آید که شدت بارش بیشتر از نفوذ باشد و هولت-هیبرت بیان می‌کند که وقتی خاک از آب اشباع شود رواناب ایجاد می‌شود (Mohammadi Vand, 2018). در ساختار مدل SMAR دو مولفه کلی در نظر گرفته شده است. مولفه اول، مربوط به بیلان آب بر مبنای گام زمانی تعریف شده است که در آن بیلان بین بارش، تبخیر و رواناب ایجاد شده و میزان ذخیره رطوبتی خاک در نظر گرفته می‌شود و مولفه روندیابی که نزول و اثرات بخشی حوضه را با استفاده از روندیابی اجزای مختلف، رواناب حاصل را در فواصل زمانی مختلف شبیه سازی می‌کند (Rostami Khalaj et al., 2016).

جهت ارزیابی کارایی و دقت مدل‌ها در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی از ضریب نش-ساتکلِف (NSE)، ضریب تعیین (R^2) و نسبت میانگین مجذورات خطا به انحراف معیار داده‌های مشاهداتی (RSR) استفاده شد (جدول ۲) و میزان کارایی و اعتمادپذیر بودن نتایج حاصل از این توابع از طریق جدول (۳) مشخص می‌شود.

جدول ۲- معیارهای ارزیابی در مدل‌های SWAT و SMAR

Table 2- Evaluation criteria in SWAT & SMAR models (Houshmand Kouchi et al., 2017)

معیار Criteria	فرمول Formula
نش-ساتکلِف (Nash-Sutcliffe efficiency)	$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i/o} - Q_{i/s})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i/o} - \bar{Q}_o)^2} \right]$
ضریب تعیین (Coefficient of determination)	$R^2 = \frac{\sum_i (Q_{i/o} - \bar{Q}_o)(Q_{i/s} - \bar{Q}_s)^2}{\sum_i (Q_{i/o} - \bar{Q}_o)^2 \sum_i (Q_{i/s} - \bar{Q}_s)^2}$
نسبت میانگین مجذورات خطا به انحراف معیار داده‌های مشاهداتی Ratio of Standard deviation of observations to root mean (square error)	$RSR = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i/o} - Q_{i/s})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i/o} - Q_m)^2} \right]$

در رابطه‌های مذکور $Q_{i/o}$ مقادیر مشاهداتی، $Q_{i/s}$ مقادیر شبیه‌سازی شده، $\bar{Q}_o$ میانگین مقادیر مشاهداتی، $\bar{Q}_s$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، n تعداد مشاهدات، Q_m انحراف استاندارد داده‌های مشاهداتی و Q_s انحراف استاندارد داده‌های شبیه‌سازی است.

جدول ۳- مقادیر و طبقات شاخص‌های NSE, R^2 , RSR

1 Horton

2 Hewlett & Hibbert

Table 3-Values and classes of NSE, R^2 & RSR indices
(Moriassi et al., 2007; Ayele, Teshale, Yu, Rutherford & Jeong, 2017)

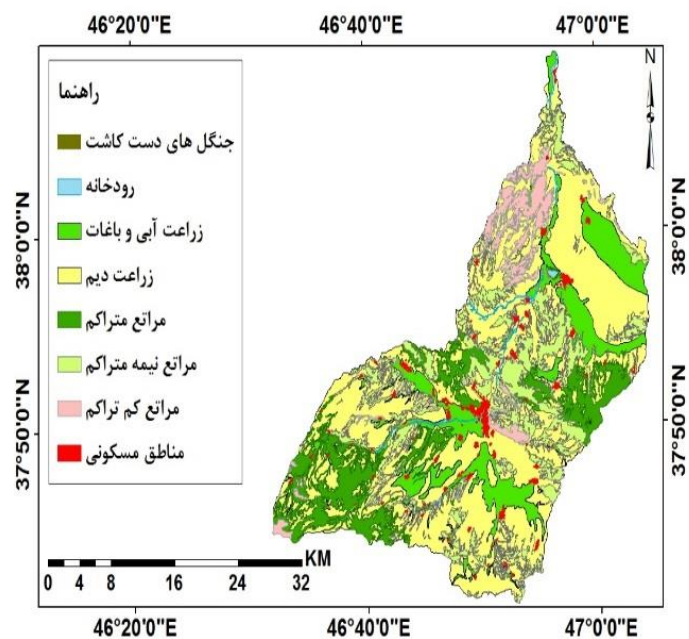
شاخص Index	مقادیر Values	طبقات Classes
NSE	1-0.75	خیلی خوب Very good
	0.75-0.65	خوب good
	0.65-0.5	رضایت بخش Satisfactory
	$NSE < 0.5$	ناکارآمد Inefficient
R^2	1-0.75	خیلی خوب Very good
	0.75-0.65	خوب good
	0.65-0.5	رضایت بخش Satisfactory
	$0.5 > R^2$	ناکارآمد Inefficient
RSR	0- 0.5	خیلی خوب Very good
	0.5-0.6	خوب good
	0.6-0.7	رضایت بخش Satisfactory
	$RSR > 0.7$	ناکارآمد Inefficient

نتایج و بحث

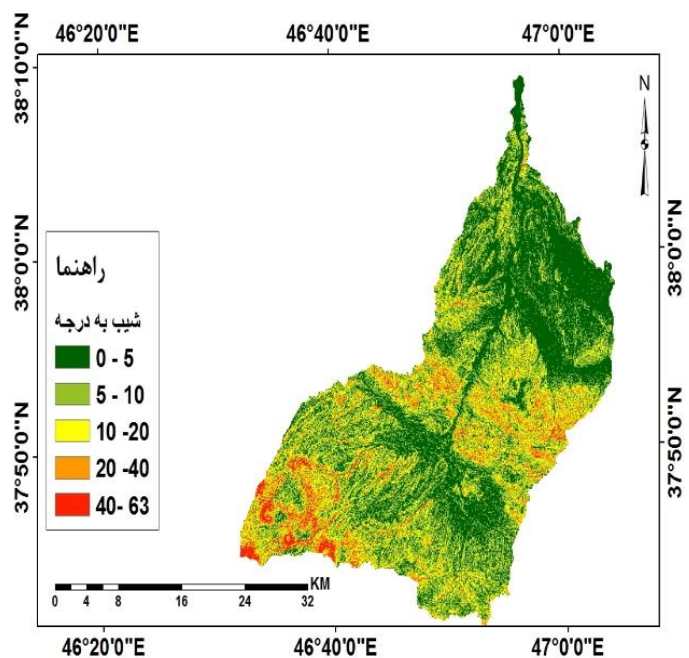
شبیه‌سازی رواناب در مدل SWAT

ابتدا با استفاده از تصویر DEM ۳۰ متر، نقشه کاربری اراضی، شیب و نقشه خاک، زیرحوضه‌ها و واحدهای واکنش هیدرولوژیک (HRU) در محیط Arc Map از طریق افزونه Arc-SWAT استخراج شد (اشکال ۲ تا ۴ و جدول ۴). در مجموع ۱۳ زیرحوضه و ۱۵۷ مورد واحد واکنش هیدرولوژیک ایجاد شد که هر کدام از این واحدها از نظر نوع کاربری، درصد شیب و هیدرولوژیک مشابه یکدیگرند و از طریق ۸ مورد ایستگاه بارانسجی و ۵ مورد ایستگاه سینوپتیک، داده‌های بارندگی ۲۴ ساعته و مقادیر دمای حداقل و حداکثر و سایر پارامترهای اقلیمی وارد مدل گردید و ایستگاه سینوپتیک تبریز و یک ایستگاه از پایگاه داده $CFSR^1$ به عنوان ایستگاه‌های مرجع جهت تولید داده‌های میانگین و باسازی داده‌های مفقوده انتخاب گردید.

1 Climate Forecast System Reanalysis



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی اوجان چای
Fig.2. The landuse map of Ojan Chay

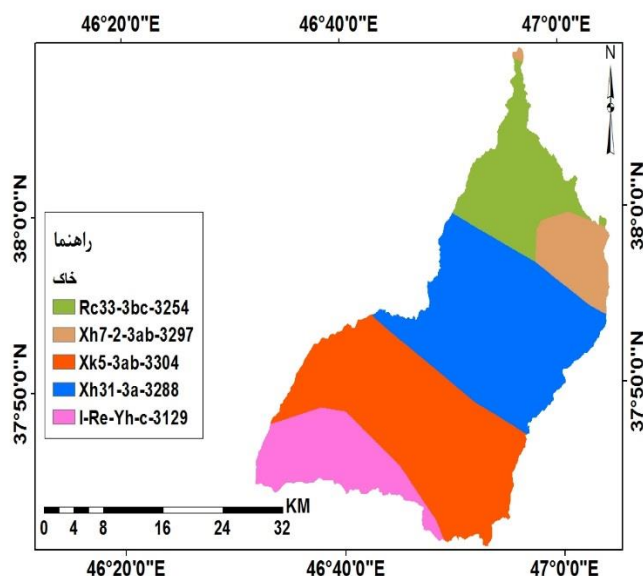


شکل ۳- نقشه شیب اوجان چای
Fig.3. The slope map of Ojan Chay

جدول ۴- مشخصات خاک اوجان‌چای (اقتباس از سایت FAO)

Table 4-The Soil features of Ojan Chay (FAO)

علامت اختصاری symbol	نام خاک Soil Name	بافت Texture	شیب Slope	توضیحات Explanations
Rc33-3bc-3254	Calcaric Regosols	ریز Fine	هموار تا تپه‌ای Rolling to hilly	ریگوسول‌هایی که حداقل بین ۲۰ تا ۵۰ سانتی متر از سطح، دارای آهک هستند. Rigosols that contain lime at least 20 to 50 cm from the surface.
Xh7-2-3ab-3297	Haplic Xerosols	ریز Fine	هموار تا تپه‌ای Rolling to hilly	دارای رژیم رطوبتی خشک Dry moisture regime
Xk5-3ab-3304	Calcic Xerosols	ریز Fine	هموار تا تپه‌ای Rolling to hilly	دارای یک افق آهکی در فاصله ۱۲۵ سانتی‌متری از سطح It has a calcareous horizon at a distance of 125 centimeters from the surface.
Xh31-3a-3288	Haplic Xerosols	ریز Fine	مسطح تا موج‌دار Level to undulating	دارای رژیم رطوبتی خشک Dry moisture regime
I-Re-Yh-c-3129	Lithosols , Eutric Regosols , Haplic Yermosols	درشت Coarse	به شدت بریده شده تا کوهستانی Steeply dissected to mountainous	خاک‌هایی که در فاصله ۱۰ سانتیمتری از سطح توسط سنگ‌های سخت و پیوسته محدود می‌شوند. Soils that are bounded by hard, continuous rocks within 10 centimeters of the surface.



شکل ۴- نقشه خاک اوجان‌چای (FAO)

Fig.4. The soil map of Ojan Chay

بعد از استخراج واحدهای واکنش هیدرولوژیک و دریافت خروجی مدل SWAT از طریق افزونه نرم‌افزار ARC MAP، نتایج به محیط نرم‌افزار SWAT-CUP انتقال داده شد. ۳ سال اول دوره آماری ۲۰۰۲-۲۰۲۱ برای دوره گرم کردن در نظر گرفته شد و جهت تعیین درجه حساسیت پارامترهای تاثیرگذار از طریق الگوریتم SUFI-2، حساسیت‌سنجی برای ۲۶ پارامتر در دوره آماری ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶ از طریق داده‌های دبی ماهانه ایستگاه هیدرومتری بستان‌آباد صورت گرفت. حساسیت پارامترها به وسیله دو معیار p -value و t -stat مشخص شد. بطوریکه اگر مقدار p -value به صفر نزدیک‌تر باشد، پارامتر برای مدل مهم‌تر است و مقدار t -stat هرچه قدر بزرگ‌تر باشد، حساسیت پارامتر بیشتر است. طبق نتایج حاصل، از ۲۶ پارامتر انتخابی، فقط ۱۲ پارامتر با حساسیت و تاثیرگذاری بیشتر به همراه محدوده مجاز تغییرات آنها در مدل وارد شدند. شماره منحنی نفوذ (CN2) به عنوان تابعی از کاربری‌اراضی، بافت خاک و شرایط رطوبتی برای تخمین تلفات آبی در نتیجه نفوذ استفاده می‌شود. مقادیر کم (CN) رواناب پایین و مقادیر بالای آن رواناب زیادی را تولید می‌کند. ظرفیت آب قابل دسترس (Sol- AWC) روی رواناب سطحی، جانبی و پایه تاثیرگذار است. تغییرات پارامتر ثابت تخلیه جریان (ALPHA_BF)، بر جریان پایه اثر می‌گذارد. ضریب مربوط به تبخیر از لایه بالایی سطح ایستابی (GW-REVP) که کنترل‌کننده حرکت جریان آب از لایه آکیر کم‌عمق به لایه‌های خاک غیراشباع است. زمان تاخیر انتقال آب (GW_DELAY) نشان دهنده اختلاف زمانی بین آب خروجی از پروفیل خاک و ورود آن به آکیر کم‌عمق است، پارامترهای TLAPS و PLAPS نیز نشان‌دهنده نرخ تغییرات دما و بارندگی به ازای افزایش ارتفاع در حوضه‌آبریز هستند. عمق آستانه شروع جریان زیرزمینی (GWQMN) عمق آستانه جریان آب در آکیر کم عمق برای جریان بازگشتی است. هدایت هیدرولیکی (CH_K2) نقش تعیین کننده‌ای در حرکت و انتقال آب و املاح در خاک دارد. که بین ۰ تا ۵۰۰ است، تبخیر آب زیرزمینی، حداقل درجه حرارت ذوب برف و ضریب تاخیر رواناب سطحی از دیگر پارامترهای با حساسیت بالا هستند که به همراه مقادیر حداقل، حداکثر و بهینه پارامترها در جدول (۵) ارائه شده است. واسنجی مدل با استفاده از مقادیر بهینه جدید پارامترها برای دوره آماری ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶ در گام زمانی ماهانه با تکرارهای متعدد شبیه‌سازی صورت گرفت تا بهترین مقادیر توابع هدف حاصل شد. پس از واسنجی پارامترها، مدل SWAT برای دوره آماری ۲۰۱۷-۲۰۲۱ در گام زمانی ماهانه اعتبارسنجی شد.

جدول ۵- پارامترهای حساس جهت استفاده در واسنجی مدل SWAT

Table 5- Sensitive parameters for using in calibration of SWAT model

مقدار بهینه Optimal	مقدار حداکثر Max.	مقدار حداقل Min.	نشانه اختصاری symbol	نام پارامتر Parameter name
0.075	0.243	-0.053	r_CN2	شماره منحنی نفوذ در شرایط متوسط رطوبتی Initial SCS curve number for moisture Condition
0.605	0.719	0.155	v_ALPHA_BF	ثابت تخلیه جریان از کانال Base flow alpha factor
-15.59	242.79	-172.29	v_GW_DELAY	زمان تاخیر انتقال آب از آخرین لایه خاک به سطح آب زیرزمینی The delay time for ground water
1.42	2.06	0.686	v_GWQMN	عمق آستانه شروع جریان زیرزمینی Threshold depth of water in the Shallow
-0.375	0.002	-0.392	r_SOL_AWC	ظرفیت آب قابل دسترس در لایه خاک Available water capacity of the soil layer
97.59	107.17	77.46	r_PLAPS	نرخ تغییرات بارش به ازای ارتفاع در زیرحوضه‌ها Precipitation lapse rate
0.849	0.857	0.424	r-SMTMP	حداقل دمای لازم برای ذوب برف Snow melt base temperature
55.46	76.06	48.13	r_CH_K2	هدایت هیدرولیکی موثر در آبرفت‌های کانال اصلی Effective hydraulic conductivity in tributary channel alluvium
116.03	293.06	-124.56	r_REVAPMN	تبخیر آب زیرزمینی Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur
0.18	0.383	-0.005	r_GW_REVAP	ضریب مربوط به تبخیر از لایه بالایی سطح ایستابی Groundwater REVAP coefficient
17.64	17.67	2.99	r_SURLAG	ضریب تاخیر رواناب سطحی Surface runoff lag time
27.40	28.58	-14.33	r_TLAPS	نرخ تغییرات دما به ازای ارتفاع در زیرحوضه‌ها Temperature lapse rate

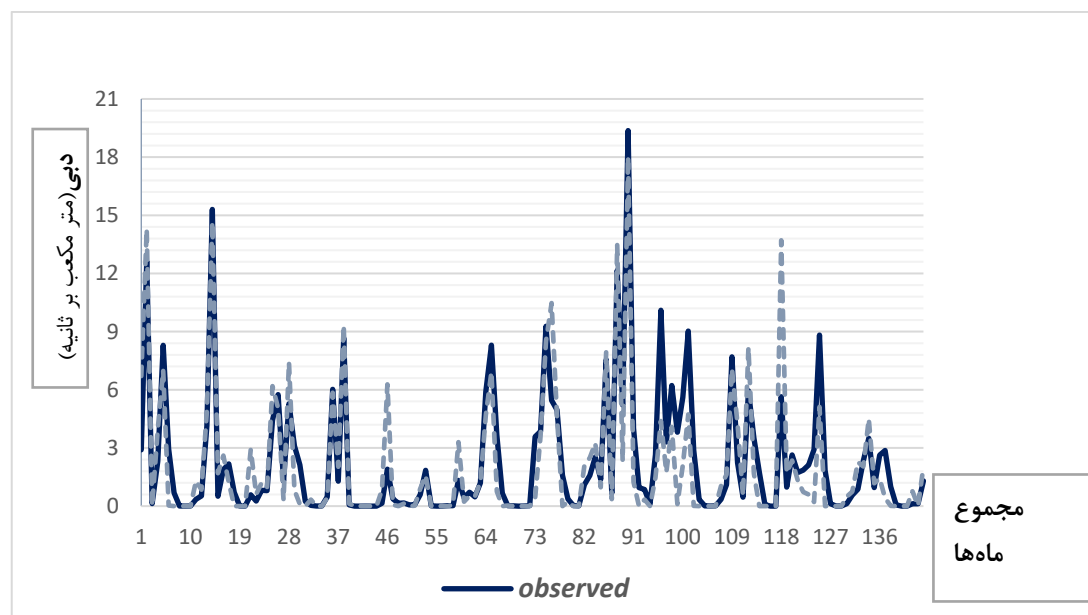
r: مقدار پارامتر ضرب در +۱ مقدار تعیین شده، v: مقدار تعیین شده جایگزین مقدار قبلی پارامتر

در واسنجی و اعتبارسنجی مدل، سه تابع هدف برای ارزیابی عملکرد مدل SWAT استفاده شد: ۱- ضریب نشت‌ساتکلیف (NSE) اختلاف نسبی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد که مقدار آن بین ۱ تا منفی بی‌نهایت متغیر است، مقدار بهینه ۱ است و اگر میزان آن از مثبت ۰/۵ بیشتر باشد مدل شبیه‌سازی خوبی داشته است طبق جدول ۳ (Moriassi et al., 2007; Ayele et al., 2017) اگر بین ۰/۷۵ تا ۱ باشد نتیجه شبیه‌سازی خیلی خوب است. نتیجه این تابع هدف در شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبریز اوجان‌چای خیلی خوب

است. ۲- ضریب تعیین R^2 ، بیان کننده بخشی از کل واریانس مقادیر مشاهداتی است که توسط مقادیر شبیه سازی شده توجیه می شود. ضریب تعیین بین صفر تا ۱ تغییر می کند و مقدار بهینه آن ۱ است (Kazemi Talkouyee, 2019). ۳- ضریب RSR با استاندارد نمودن مقادیر باقیمانده میانگین مربعات خطا با استفاده از مقادیر مشاهداتی به دست می آید. برای این پارامتر مقادیر کمتر از ۰/۷ قابل قبول می باشد. نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی در جدول (۶) و در شکل های (۵) و (۶) ارائه شده است.

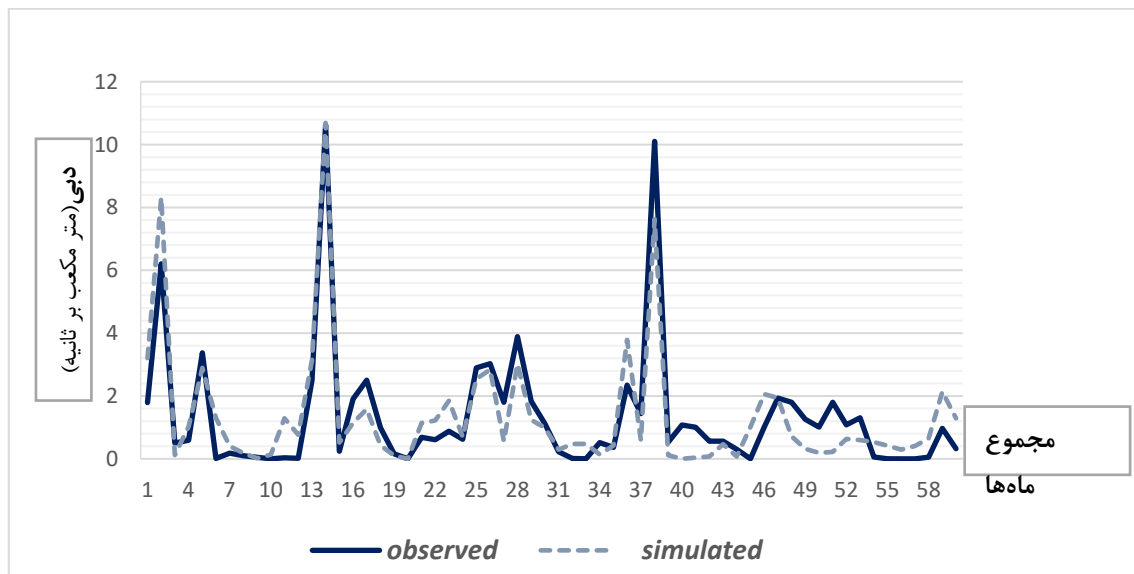
جدول ۶- مقادیر شاخص های ارزیابی شبیه سازی رواناب در مراحل واسنجی و اعتبار سنجی مدل SWAT
Table 6- Values of evaluation indices in runoff simulation in calibration & validation of SWAT

مرحله Period	دوره آماری Statistical period	P-factor	R-factor	R^2	NSE	RSR
واسنجی Calibration	2005-2016	0.75	0.96	0.81	0.80	0.45
اعتبار سنجی Validation	2017-2021	0.68	0.89	0.75	0.74	0.51



شکل ۵- نمودار دبی مشاهداتی و شبیه سازی شده اوجان چای در مرحله واسنجی (۲۰۰۵-۲۰۱۶)

Fig.5. Chart of observational & simulated discharge of Ojan Chay in calibration(2005-2016)



شکل ۶- نمودار دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده اوجان‌چای در مرحله اعتبارسنجی (۲۰۲۱-۲۰۱۷)
 Fig.6. Chart of observational & simulated discharge of Ojan Chay in validation (2017-2021)

نتایج جدول (۶) نشان‌دهنده این است که بعد از حساسیت‌سنجی و اعمال پارامترهای بهینه‌شده در دوره واسنجی، ضرایب نش‌ساتکلیف (NSE)، R^2 و RSR به ترتیب برابر با ۰/۸۰، ۰/۸۱ و ۰/۴۵ به دست آمد. نتایج مدل در مرحله واسنجی، در محدوده خیلی خوب قرار گرفت. برای دوره اعتبارسنجی نیز داده‌های دبی ماهانه در طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ وارد مدل گردید. ضرایب نش‌ساتکلیف (NSE)، R^2 و RSR در این مرحله به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۷۵ و ۰/۵۱ است که این نتایج دلالت بر توانایی مدل هیدرولوژیکی SWAT در شبیه‌سازی دبی حوضه‌آبریز اوجان‌چای دارد و کارایی مدل بر اساس مقادیر شاخص‌های ارائه شده در جدول (۳)، خیلی خوب ارزیابی می‌شود. اشکال (۵) و (۶) نمودارهای شبیه‌سازی شده رواناب حوضه‌آبریز اوجان‌چای را در دوره واسنجی و اعتبارسنجی در مقیاس ماهانه را نشان می‌دهد. بررسی این نمودارها نشان می‌دهد که دبی‌های حداکثر را کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد که این امر خصوصاً در ماه‌های فوریه و مارس (زمستان) و فصل بهار است که این یکی از دلایل ضعف مدل در برآورد دبی‌های حداکثر است که دلیل آن استفاده از روش SCS است که بخوبی نمی‌تواند رواناب ناشی از ذوب برف را شبیه‌سازی کند که این شرایط در ماه‌های فروردین و اردیبهشت که خصوصاً زمان شروع بارش‌های محلی نیز است، در برخی از سال‌ها مشهود است.

شبیه‌سازی رواناب در مدل SMAR

با توجه به اینکه این نوع از مدل‌ها نسبت به مدل‌های نیمه‌توزیعی به داده‌های ورودی کمتری نیاز دارند. داده‌های بارندگی ماهانه، تبخیر و تعرق ماهانه ایستگاه‌های سینوپتیک (سازمان هواشناسی استان آذربایجان شرقی) و داده‌های دبی ماهانه ایستگاه هیدرومتری بستان‌آباد سازمان آب منطقه‌ای، مطابق فرمت نرم‌افزار، وارد

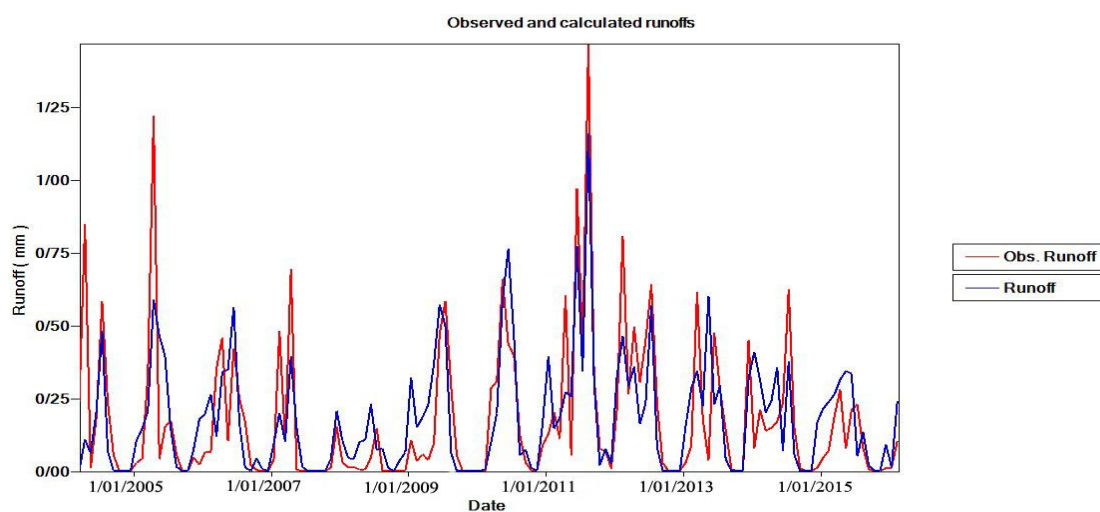
مدل گردید. جدول (۷) پارامترهای مورد استفاده جهت ارزیابی مدل از طریق الگوریتم ژنتیک را با مقادیر پیش فرض، دامنه تغییرات عددی و مقادیر بهینه آن‌ها را نشان می‌دهد، از این ۹ پارامتر، ۵ مورد مربوط به بیلان آب و بقیه مربوط به روندیابی جریان است: C: پارامتر بدون بعد که بیانگر تبخیر از سطح لایه‌های خاک است. Z: این پارامتر بیان‌کننده ظرفیت ذخیره رطوبتی موثر خاک بر حسب میلی‌متر است. H: نسبتی از بارش مازاد که در تولید رواناب مشارکت دارد (هنگامیکه خاک اشباع می‌شود). Y: بیان‌کننده ظرفیت نفوذ خاک است و جهت تخمین رواناب مازاد نفوذ (جریان هورتونی) به کار می‌رود. T: پارامتری بدون بعد که جهت محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل از تشت تبخیر بکار می‌رود. G: پارامتری بدون بعد که جهت تخمین بخشی از رطوبت مازاد بر ظرفیت ذخیره رطوبتی خاک که آب زیرزمینی را تغذیه می‌کند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. Kg: بیانگر زمان تاخیر روندیابی آب زیرزمینی است. N: بیانگر ضریب روندیابی خطی هیدروگراف رواناب سطحی است. Nk: بیانگر مولفه روندیابی خطی هیدروگراف رواناب سطحی است. لذا با توجه به پارامترها و الگوریتم ژنتیک واسنجی مدل در دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۱۶ و اعتبارسنجی در دوره آماری ۲۰۱۷-۲۰۲۱ صورت گرفت و معیارهای نش-ساتکلیف و R^2 جهت ارزیابی عملکرد مدل در نظر گرفته شد. که نتایج ارزیابی در جدول (۸) و شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده است.

جدول ۷- مقادیر پیش فرض بهینه شده مدل SMAR
Table 7-Optimized default values of SMAR model

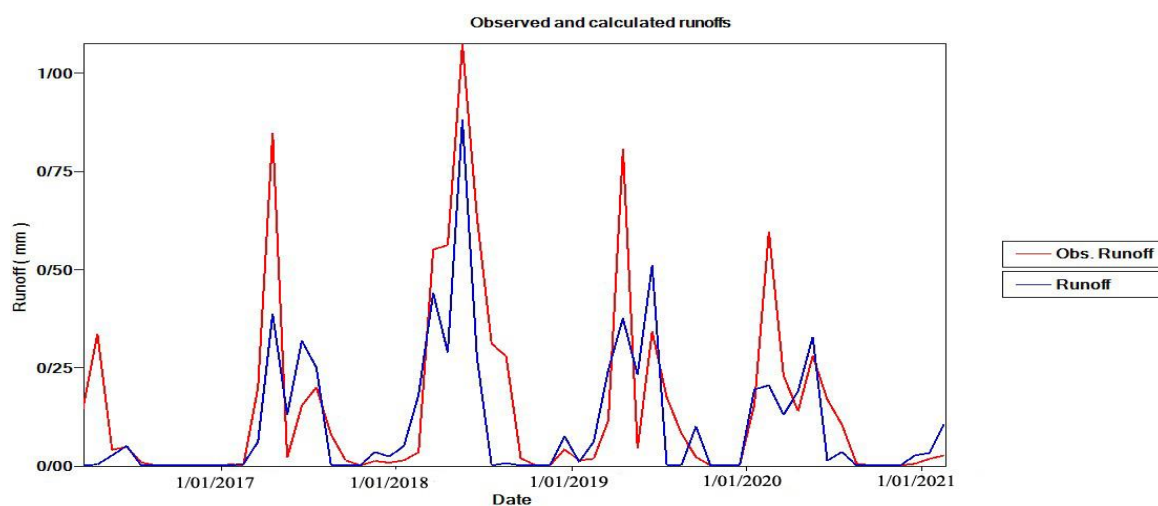
مقدار بهینه Optimal value	محدوده تغییرات Range of changes	مقدار پیش فرض Default value	پارامتر Parameter
0.816	0-1	0	تبخیر آب زیرزمینی (C) Groundwater evaporation rate
0.090	0-1	0	ضریب جریان آب زیرزمینی (G) Groundwater evaporation coefficient
0.012	0-1	0	نسبت رواناب مستقیم (H) Porportion direct runoff
0.855	0-1	0	ضریب فقدان ذخیره (Kg) Storage loss coefficient
1.1	1-6	1	U.H ضریب روندیابی خطی (N) U.H linear routing
1	0.01-1	1	مولفه روندیابی خطی (Nk) Component N.k
0.098	0-1	0	پارامتر تبدیل تبخیر (T) Evaporation conversion parameter
627	0.5000	0	نرخ نفوذ (Y) Infiltration rate
3706	0-5000	200	عمق ذخیره کلی رطوبت خاک (Z) Soil Moisture total storage depth

جدول ۸- مقادیر شاخص‌های ارزیابی شبیه سازی رواناب در مراحل واسنجی و اعتبار سنجی مدل SMAR
Table 8- Values of evaluation indices in runoff simulation in calibration & validaton of SMAR

مرحله Period	دوره آماری Statistical period	R^2	NSE
واسنجی Calibration	2005-2016	0.56	0.60
اعتبار سنجی Validation	2017-2021	0.67	0.625



شکل ۷- نمودار دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده اوجان‌چای در مرحله واسنجی SMAR
Fig.7. Chart of observational & simulated discharge of Ojan Chay in calibration of SMAR



شکل ۸- نمودار دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده اوجان‌چای در مرحله اعتبارسنجی SMAR
Fig.8. Chart of observational & simulated discharge of Ojan Chay in validation of SMAR

با توجه به نتایج جدول‌های ۷ و ۸، پارامترهای تبخیر آب زیرزمینی، ضریب فقدان ذخیره، نرخ نفوذ و عمق ذخیره کلی رطوبت بیشترین تغییرات را در رابطه با مقدار پیش‌فرض دارند. ضرایب آماری نش‌ساتکلیف و R^2 (۰/۶۰ و ۰/۵۶) با استفاده از بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک که برای ارزیابی بارش-رواناب در مرحله واسنجی بکار رفته، نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل SMAR با توجه به جدول ۳ (Moriassi et al., 2007, Ayele et al., 2017) است و مقادیر ضریب نش‌ساتکلیف و R^2 و در دوره اعتبارسنجی نیز برابر با ۰/۶۲۵ و ۰/۶۷ است. بررسی نمودارهای شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که مدل SMAR نیز همانند مدل SWAT مقادیر دبی‌های پایه و متوسط را خوب شبیه‌سازی کرده است، اما در مورد دبی‌های حداکثر در مواردی شبیه‌سازی خوبی نداشته است که یا بیشتر از مقدار واقعی و یا کمتر از حد واقعی، رواناب را برآورد کرده است. اما در مجموع می‌توان گفت که اگر چه هر دو مدل ارزیابی خوبی در شبیه‌سازی رواناب در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی دارند، با این حال عملکرد مدل SWAT با توجه به مقادیر بالای ضرایب آماری نش‌ساتکلیف و R^2 هم در واسنجی و هم در اعتبارسنجی، برتری آن را به مدل SMAR نشان می‌دهد که مطالعات رضازاده و همکاران (Rezazadeh, Ganjalikhani & Zounemet Kermani, 2015)، افخمی و نصیری صالح (Afkhani & Nasiri, 2015)، گلشن و همکاران (Golshan et al., 2016) و شاهویی و پرهمت (Shahoei & Porhemmar, 2019) تایید کننده برتری مدل‌های نیمه توزیعی به یکپارچه است که علت آن از یک سو نیمه‌توزیعی بودن مدل SWAT است که تمام تغییرات مکانی عوارض زمین را در نظر می‌گیرد و از سوی دیگر داشتن مولد تولید پارامترهای اقلیمی برای داده‌های مفقوده است. درحالی‌که مدل‌های یکپارچه بر این فرض استوار است که تغییرات دوره زمانی داده‌های اقلیمی و پارامترهای مدل در سطح حوضه یکنواخت هستند. درحالت کلی می‌توان گفت؛ مدل‌های یکپارچه و نیمه‌توزیعی می‌توانند بصورت مکمل هم بکار روند، روش‌های یکپارچه به داده‌های ورودی کمتری نسبت به مدل‌های نیمه‌توزیعی نیاز دارند که این امر در حوضه‌هایی که با کمبود آمار مواجه‌اند و از لحاظ مدیریتی هدف کاهش هزینه‌ها و سرعت ارزیابی است، مناسب می‌باشد. از طرف دیگر در مدل SWAT برای هر واحد واکنش هیدرولوژیکی که از نظر بافت خاک، کاربری اراضی و شیب همگن هستند، یک شماره منحنی جداگانه محاسبه می‌شود و رواناب در هر واحد واکنش هیدرولوژیکی به‌طور مستقل محاسبه و روندیابی می‌شود تا در نهایت مقدار رواناب کل حوضه محاسبه شود. این روش دقت محاسبات را افزایش می‌دهد و توصیف فیزیکی بهتری از بیلان آبی حوضه را ارائه می‌کند.

نتیجه گیری

در این پژوهش از مدل فیزیکی و نیمه‌توزیعی SWAT و مدل یکپارچه SMAR برای شبیه‌سازی رواناب حوضه‌آبریز اوجان‌چای در دوره ۲۰ ساله استفاده شد. در مدل SWAT حساسیت‌سنجی پارامترها با روش P-Value و T-Stat در محیط نرم افزار SWAT-CUP نشان داد که پارامترهای شماره منحنی، ثابت تخلیه جریان از کانال، زمان تاخیر انتقال آب از آخرین لایه خاک به سطح آب زیرزمینی، عمق آستانه شروع جریان زیرزمینی، ظرفیت آب قابل دسترس در لایه خاک، ضریب تاخیر رواناب سطحی، حداقل دمای لازم برای ذوب برف، نرخ تغییرات دما و بارش به ازای ارتفاع، ضریب مربوط به تبخیر از لایه بالایی سطح ایستابی، هدایت هیدرولیکی و تبخیر آب زیرزمینی حساسیت بیشتری دارند. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌های نش‌ساتکلیف (NSE)، ضریب تعیین R^2 و نسبت میانگین مجذورات خطا به انحراف‌معیار داده‌های مشاهداتی (RSR) در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی بیانگر کارایی خیلی خوب آن در شبیه‌سازی رواناب در حوضه‌آبریز مورد مطالعه است و در مدل SMAR از ۹ پارامتر مورد استفاده در شبیه‌سازی رواناب، پارامترهای نرخ نفوذ، ضریب فقدان ذخیره، تبخیر آب زیرزمینی و عمق ذخیره کلی رطوبت خاک بیشترین تغییرات را نسبت به مقدار پیش‌فرض خود داشتند. عملکرد مدل در واسنجی و اعتبارسنجی با بکارگیری الگوریتم ژنتیک، با توجه به توابع نش‌ساتکلیف (NSE)، ضریب تعیین R^2 نشان‌دهنده عملکرد رضایت‌بخش مدل SMAR است. هر دو مدل در رابطه با دبی‌های متوسط و پایه عملکرد خوبی ارائه داده‌اند. یکی از ضعف‌های هر دو مدل برآورد نامناسب دبی‌های پیک و وقایع شدید بوده است. فقدان داده‌های موردنیاز (بارش، دمای حداقل و حداکثر، رطوبت‌نسبی، سرعت باد و ...)، عدم ثبت درست داده‌ها توسط سازمان ذیربط، نیاز مدل SWAT به ورود حجم بالایی از داده و غیره همه از جمله دلایلی هستند که باعث کاهش دقت مدل‌ها و خطا می‌شود. نتایج مطالعات بیاتی‌خطیبی و کرمی (Bayati khatibi & Karami, 2019a) و بیاتی‌خطیبی (Bayati khatibi, 2020) نشان می‌دهد که ارتفاع و حجم رواناب در طی ۲۰ سال به دو برابر افزایش یافته است که تغییرات کاربری زمین از مرتع به زمین کشاورزی، نه تنها بر میزان رواناب‌ها، بلکه بر سرعت رواناب‌ها نیز افزوده است و وقوع بارش‌های روزانه شدید باعث شده در کمترین زمان، رواناب‌های عمیق با حجم بالا تشکیل گردد. که نتیجه آن گسترش فرسایش آبی، حرکات توده‌ای مواد در دامنه‌ها و سیلاب‌های ناگهانی است که در اردیبهشت و تیر ماه سال ۱۴۰۲ باعث خسارات اقتصادی به روستاهای حوضه‌آبریز اوجان‌چای از جمله شیرین‌بلاغ و قره‌اونه شده است. در مجموع از محدودیت‌های پژوهش می‌توان به این موارد اشاره کرد: ۱- نیاز به حجم بالای از داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی که زمان‌بر و پرهزینه است. ۲- خطاهای بالای افزونه Arc SWAT که ممکن است به دلیل عدم لایسنس نرم‌افزارهای Arc GIS باشد. ۳- نسخه‌های جدید نرم‌افزار که عمدتاً پولی و تقریباً غیرقابل دسترس برای بیشتر کاربران است که باعث عدم استفاده از بخش‌های توسعه‌یافته مدل SWAT شود. در مجموع می‌توان گفت استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی (یکپارچه و نیمه‌توزیعی) می‌تواند به شناخت بهتر منابع آبی و ارتقاء کیفیت مدیریت آب و خاک خصوصاً در زمینه مخاطرات مرتبط با آن‌ها کمک شایانی کند.

References

- Afkhami, M., & Nasiri, F. (2015). Evaluation of the Application Distributed and Lumped Hydrologic Models in Simulation of Mean Daily Flow Discharge in Gharasoo River Basin in Ardebil. *Journal of Modares Engineering*, 15(5), 31-40. [In Persian] <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-3875-fa.html>
- Ahmadi, M., Moeini, A., Ahmadi, H., Motamedvaziri, B., & Zehtabiyan, G. R. (2019). Comparison of the Performance of SWAT, IHECRAS And Artificial Neural Networks Models in Rainfall-Runoff Simulation (Case study: Kan Watershed, Iran). *Physics and Chemistry of the Earth*, 111, 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.05.002>
- Arekhi, S., Karkaz, S., & Emadodin, S. (2023). Flood Risk Zoning Due to Climate Change Using SWAT Hydrological Model in GIS Environment(Case Study: Gharasoo Watershed, Golestan Province). *Journal of Climate Change Research*, 4(14), 1-26. [In Persian] <https://doi.org/10.30488/CCR.2023.394308.1127>
- Ayele, G. T., Teshale, E. Z., Yu, B., Rutherford, I. D., & Jeong, J. (2017). Streamflow And Sediment Yield Prediction For Watershed Prioritization in the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Water*, 9(10), 782. <https://doi.org/10.3390/W9100782>
- Bayati khatibi, M., & Karami, F. (2019a). The Estimation of Uplifting Share on Gully Erosion Rates Over Slopes, Case Study: Ojan Chay, North Eastern Slopes of Sahand Mountain. *Quantitative Geomorphological Research*, 8(2), 38-51. [In Persian] https://www.geomorphologyjournal.ir/article_98646.html?
- Bayati khatibi, M., & Karami, F. (2019b). The Time and Runoff Velocity Estimation on Slopes of Ojan Chay Watershed. *Quantitative Geomorphological Research*, 7(4), 1-14. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1398.7.4.1.5>
- Bayati khatibi, M. (2020). Investigating the Role of Land Use Changes in Hydrological Changes of Surfaces in Mountainous Area, Case Study: Ojan Chay. *Hydrogeomorphology*, 7(24), 127-144. [In persain] <https://doi.org/10.22034/HYD.2020.41198.1540>
- Busico, G., Colombani, N., Frozi, D., Pellegrini, M., Tazioli, A., & Mastrocicco, M. (2020). Evaluating SWAT Model Performance Actual and Future Runoff Susceptibility in a highly Urbanized Basin. *Journal of Environmental Management* 266, 110625. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110625>
- Dastjerdi, F., Azarakhshi, M., & Bashiri, M. (2019). Comparison of Efficiency for Hydrological Models (AWBM & SIHYD) and Neural Network (MLP & RBF) in Rainfall-Runoff Simulation (Case -Study:Bar Aryeh Watershed- Neyshabur). *Journal of Watershed Management Science*, 13(45), 107-118. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089554.1398.13.45.13.7>
- Fazeli Thani, A., Motamad Vaziri, B., & Gaderi, K. (2016). A Review of Hydrological Modeling Softwares of Watershed, Introduction & Applications. Paper presented at the International Conference on Civil Engineering, Architecture, Urban Management & Environment in the Third Millennium, 1-23. [In Persian] <https://civilica.com/doc/585782>
- Ferreira, R. G., Dias, R. L. S., de Siqueira Castro, J., dos Santos, V. J., Calijuri, M. L., & da Silva, D. D. (2021). Performance of hydrological models in fluvial flow simulation. *Ecological Informatics*, 66, 101453. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101453>

- Golshan, M., Esmali Ouri, A., Shahedi, K., & Jahanshahi, A. (2016). Performance evaluation of SWAT and IHACRES models to simulate runoff in Khorramabad watershed. *Water and Soil Science*, 26(2-1), 29-42. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_5048_en.html?
- Guo, B., Zhang, J., Xu, T., Song, Y., Liu, M., & Dai, Z. (2022). Assessment of multiple precipitation interpolation methods and uncertainty analysis of hydrological models in Chaohe River basin, China. *Water SA*, 48(3), 324-334. <https://doi.org/10.17159/wsa/2022.v48.i3.324-334>
- Houshmand Kouchi, D., Esmaili, K., Faridhosseini, A., Sanaeinejad, S. H., Khalili, D., & Abbaspour, K. C. (2017). Sensitivity of calibrated parameters and water resource estimates on different objective functions and optimization algorithms. *Water*, 9(6), 384. <https://doi.org/10.3390/w9060384>
- Kaffas, K., Hrisanthou, V., Sevastas, S. (2018). Modeling Hydromorphological Processes in a Mountainous Basin Using a Composite Mathematical Model and Arc SWAT. *Catena*, 162, 108-129. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.017>
- Karami, F., Bayatikhatabi, M., & Ganbari, A. (2016). *Estimation of Runoff and Sediment in Ahar Chay By Using The Soil and Water Assessment Model (SWAT)*. Research Project, Faculty of Geography & Planning, University of Tabriz.
- Karami, F., Bayatikhatabi, M., & Ganbari, A. (2017). *Investigating the Efficiency of Hydrological and Hydraulic Models in Determining Flood Zones in Ahar Chay*. Research Project, Faculty of Geography & Planning, University of Tabriz.
- Kazemi Talkouyee, A., Jourgholami, M., Abbaspour, K., & Feghhi, J. (2019). Simulation runoff and sediment yield in a harvested forest (Case study: Zailakirood Basin, northern Iran). *Iranian Journal of Forest*, 11(1), 29-41. [In Persian] https://www.ijf-isaforestry.ir/article_89235.html?
- Khavarian, H., Aghaie, M., & Mostafazadeh, R. (2020). Predicting the effects of land use changes on the monthly flow using hydrological model and Remote Sensing in the Kouzetopraghi watershed, Ardabil. *Hydrogeomorphology*, 7(24), 19-39. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/HYD.2020.37489.1512>
- Lin, B., Chen, X., Yao, H., Chen, Y., Liu, M., & Gao, L. (2015). Analyses of Landuse Change Impacts on Catchment Runoff Using Different Time Indicators Based on SWAT Model. *Ecological Indicators*, 58, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.031>
- Lv, Z., Zuo, J., & Rodriguze, D. (2020). Predicting of Runoff Using an Optimized SWAT-ANN: A Case Study. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 29, 100688, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100688>
- Mansouri, B., & Pirmoradian, R. (2019). Evaluation and Comparison of Lumped and Semi-Distributed Rainfall-Runoff Models. *Journal of Water and Sustainable Development*, 5(2), 81-90. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/jwsd.v5i2.66081>
- Memgistu, K. T. (2009). *Watershed hydrological Responses to Changes in Land Use and Land Cover and management Practises at Hare Watershed, Ethiopia*. Research Institute for Water and Enviroment. <https://dspace.ub.uni-siegen.de/handle/ubsi/420>

- Mohammadi Vand, M. R. (2018). *Assessment and Comparison of Hydrological Models with Different Structures in a Single Basin*. Master's thesis, Water Resources Engineering, Irrigation and Reclamation Engineering Department, University of Tehran. [In Persian]
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2005) *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2005*. Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, Temple. <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>
- Parvaz, M., & Shahoei, S. V. (2022). Investigation Using AWBM Model for Monthly Runoff Simulation of Urmia Lake Basin in Kurdistan Province, Sonate station. *Journal of Environmental Science Studies*, 7(3), 5347-5359. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/JESS.2022.342020.1783>
- Ramezani, M. R., Helfer, F., & Yu, B. (2023). Individual and combined impacts of urbanization and climate change on catchment runoff in Southeast Queensland, Australia. *Science of The Total Environment*, 861, 160528. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160528>
- Rashidi, B., Araghinejad, S., & Ebrahimi, K. (2017). Improving runoff prediction using WAPABA model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(1), 87-94. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/IJWR.2017.61343>
- Reddy, N. M., Saravanan, S., & Abijith, D. (2023). Streamflow simulation using conceptual and neural network models in the Hemavathi sub-watershed, India. *Geosystems and Geoenvironment*, 2(2), 100153. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2022.100153>
- Rezaei Moghadam, M. H., Hejazi, M. A., & Behbody, A. (2018). Estimation of Runoff Catchment in East Azerbaijan Province: Comparative Application of Calibration Methods and Uncertainty Analysis of SWAT Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 8(3), 59-75. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/GEO.V8I3.81998>
- Rezaei Moghaddam, M. H., Mokhtari, D., & Shafieimehr, M. (2021). Calibration and validation the SWAT model in the simulation of runoff and sediment in Shahr Chai of Miyaneh. *Journal of Geography and Planning*, 25(76), 129-139. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gp.2020.40775.2656>
- Rezazadeh, M. S., Ganjalikhani, M., & Zounemat-Kermani, M. (2015). Comparing the performance of semi-distributed SWAT and lumped HEC-HMS hydrological models in simulating river discharge (Case study: Ab-Bakhsha Watershed). *Journal of Ecohydrology*, 2(4), 467-479. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/IJE.2015.58074>
- Rezvani, F. S., Ghorbani, K., Salarijazi, M., Rezaei Ghaleh, L., & Yazarloo, B. (2023). Comparative assessment of Sacramento, SMAR, and SimHyd models in long-term daily runoff simulation. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(1), 279-297. [In Persian] <https://doi.org/10.22098/MMWS.2022.11794.1171>
- Roostaei, S., Ayaseh, F., & Rezayi Moghadam, M. H. (2020). Quasi 2 Dimentional Simulation of Lighvan River Flood Flow With Emphasis On Floodplain Using MIKE 11 Technique.

- Quantitative Geomorphological Research*, 9(1), 28-41 [In Persian]
<https://doi.org/10.22034/GMPJ.2020.109532>
- Rostami Khalaj, M., Moghadamnia, A. R., Salmani, H., & Sepahvand, A. R. (2016). Compare the Performance of AWBM, SACRAMENTO, SIMHYD, SMAR And Tank. *Natural Ecosystems of Iran*, 7(2), 47-63. [In Persian]
- Saraie, B., Talebi, A., Mazidi, A., & Parvizi, S. (2020). Prioritization of Sardab- Rood WaterShed From Flooding Viewpoint using the SWAT Model. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 9(23), 85-98. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/JNEH.2019.29033.1500>
- Setegn, S. G., Dargahi, B., Srinivasan, R., & Melesse, A. M. (2010). Modeling of Sediment Yield From Anjeni–Gauged Watershed, Ethiopia Using SWAT Model, JAWAR. *Journal of the American Water Resources Association*, 46(3), 514-526.
<https://doi.org/10.1111/j.17521688.2010.00431.x>
- Shafiei, M., & Gharari, S. (2018). A Review on Hydrological Modelling Concepts: Part 1 - Introduction of Modelling Process. *Journal of Water and Sustainable Development*, 4(2), 95-102. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/JWSD.V4I2.62154>
- Shahoei, S. V., & Porhemmat, J. (2019). Comparison and Assessment of Two Lumped AWBM and Semi-Distributed SWAT Models in Monthly Runoff Simulation of Gharah-Sou River in Kermanashah Province, Iran. *Environment and Water Engineering*, 5(1), 71-82. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jewe.2019.143387.1275>
- Shikh Gooderzi, M., Jabbarian Amiri, B., & Azarnivend, H. (2018). Investigating Performance of the Conceptual Models in River Hydrologic Simulation. *Journal of Natural Environment*, 71(4), 509-521. [In Persian]
<https://doi.org/10.22059/JNE.2018.227408.1339>
- Song, M., Shi, Y., Yao, H., & Zhang, W. (2019). A Comparative Study of Different Hydrological Model and Their Application in Bass River Catchment. Paper presented at the Proceedings of the 7th Annual International Conference on Material Science and Engineering 562 , 1-6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/562/1/012116>
- Zarezade Mehrizi, S. O., Khorani, A., Bazrafshan, J., & Bazrafshan, O. (2017). Assessing the efficiency of SWAT model for runoff simulation in Gamasiyab basin. *Journal of Range and Watershed Managment*, 70(4), 881-893. [In Persian]
<https://doi.org/10.22059/JRWM.2018.243898.1174>



A Meta-Analysis and Systematic Review of Integrating Satellite-Derived Aerosol Optical Depth Data with Machine Learning for Estimating Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Concentrations

Rasool Taherian Esfahani^a, Mehdi Ghanbarzadeh Lak^{a*}

^a Civil Engineering Department, School of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

Article Info	Abstract
Article history Received :13 July 2024 Received in revised form: 4 December 2024 Accepted: 25 December 2024 Available online: 21 March 2025	Exposure to fine particulate matter (PM_{2.5}) significantly impacts public health, particularly in regions where annual average levels of PM_{2.5} exceed the World Health Organization (WHO) guidelines. According to the literature, in Iran, elevated fine particulate matter levels contribute substantially to mortality among adults. The spatial coverage limitations and intermittent data gaps of ground PM_{2.5} monitoring stations pose challenges for effective air quality management. The products of remote sensing technologies, such as Aerosol Optical Depth (AOD) from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensors, offer a promising alternative for fine particulate matter estimation. This study reviews previous research on using machine learning algorithms to predict PM_{2.5} ground concentrations based on AOD data. A structured analysis of 127 selected studies reveals varying correlations between AOD and PM_{2.5} (with the resultant coefficient of determination, R², between ground PM_{2.5} concentrations and AOD data ranging from 48 to 99%), influenced by auxiliary variables like meteorological conditions and environmental factors. Integrating these variables enhances prediction accuracy, though it may increase complexity and potential errors in machine learning models. The hybrid machine learning models demonstrate superior performance compared to individual algorithms, leveraging their adaptability, parallel processing capabilities, and ability to handle missing data. Despite advancements, challenges persist due to data uncertainty and meteorological dynamics. In conclusion, while machine learning offers robust tools for PM_{2.5} forecasting using AOD data, ongoing research is essential to address existing limitations and optimize model performance amidst environmental variability.
Keywords: PM2.5, AEROSOL OPTICAL DEPTH (AOD), MACHINE LEARNING, MODIS, ENSEMBLE LEARNING, HYBRID MODELS, SYSTEMATIC REVIEW, PUBLIC HEALTH IMPACT	

*.Corresponding author: Ghanbarzadeh Lak

E-mail address: m.ghanbarzadehlak@urmia.ac.ir

How to cite this article: Taherian Esfahani, R., & Ghanbarzadeh Lak, M. (2025). A Meta-Analysis and Systematic Review of Integrating Satellite-Derived Aerosol Optical Depth Data with Machine Learning for Estimating Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Concentrations. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), pp.151-186, DOI:https://doi.org/10.22067/geoh.2024.88696.1497



Extended Abstract

Introduction

Air pollution, an inevitable consequence of industrialization, climate change, and increased fossil fuel usage, has emerged as a critical environmental concern, especially in urban areas. Globally, air pollution is recognized as one of the leading environmental health risks, contributing significantly to premature mortality and morbidity, with Iran ranking particularly high in terms of annual deaths linked to air pollution. Recent data place air pollution as the eighth leading global risk factor for mortality and the seventh in Iran, underlining its severe public health implications. The health effects range from respiratory and cardiovascular diseases to heightened risks of cancer. Emerging evidence also highlights the psychological and cognitive effects of air pollution, linking it to anxiety, depression, reduced cognitive performance, and even increased criminal tendencies.

Among air pollutants, fine particulate matter (PM_{2.5}) is especially concerning due to its ability to penetrate deep into the respiratory system and bloodstream, causing widespread systemic harm. PM_{2.5} particles, with diameters of 2.5 microns or less, are associated with increased risks of heart attacks, strokes, and chronic lung diseases. In Iran, approximately 75,000 deaths annually are attributed to PM_{2.5} exposure. The average population-weighted PM_{2.5} concentration in the country stands at 48 µg/m³—substantially higher than the World Health Organization’s recommended maximum of 10 µg/m³. Such alarming figures underscore the critical need for effective air quality management strategies, including accurate and consistent monitoring of PM_{2.5} concentrations.

Conventional ground-based air quality monitoring stations are valuable for tracking PM_{2.5} levels but are limited by their sparse spatial coverage, especially in smaller cities and rural regions. To complement ground-based monitoring, remote sensing technologies have gained prominence as a means of providing broader spatial coverage. Aerosol Optical Depth (AOD), derived from satellite observations, is a key parameter for assessing atmospheric aerosols and estimating PM_{2.5} concentrations. Sensors such as the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) have been instrumental in providing AOD data through retrieval algorithms like Dark Target (DT) and Deep Blue (DB). However, traditional approaches for converting AOD data into PM_{2.5} concentrations often fall short in accuracy and adaptability, necessitating the exploration of advanced methodologies like machine learning.

The Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) method was employed in the present paper to evaluate relevant studies and summarize the findings of previous research. The main advantage of this method compared to others lies in its high accuracy in extracting information, reducing bias, and providing a comprehensive and well-documented perspective on previous research findings. This approach, particularly in studies based on quantitative data, yields stronger and more reliable results. The focus of the analysis was centered on three main axes:

1. Identifying factors that significantly influence the establishment of a statistically meaningful correlation between AOD data obtained from satellite imagery and PM_{2.5} data derived from ground-based monitoring;
2. Assessing the success rate of previous research in establishing such correlations using statistical indicators; and

3. Examining the machine learning algorithms employed in these studies.

Material and Methods

This study systematically reviews machine learning algorithms used for estimating PM_{2.5} concentrations based on AOD data, focusing on their performance, scalability, and adaptability across diverse environmental settings. The primary objectives are to identify the strengths and limitations of existing methodologies, highlight gaps in current research, and propose avenues for improvement.

To ensure a comprehensive analysis, the study employed a systematic review and meta-analytical approach based on the PRISMA guidelines. Reputable scientific databases, including PubMed, Google Scholar, and Science Direct, were queried using keywords (Fig. 1) such as "PM_{2.5} estimation," "Aerosol Optical Depth," and "machine learning." An initial pool of 977 documents was narrowed down to 127 highly relevant articles through a rigorous screening process (Fig. 2). Key extraction parameters included the correlation between AOD and PM_{2.5}, machine learning models employed, and performance metrics such as R² values, root mean square error (RMSE), and mean absolute error (MAE).

Results and Discussion

Correlation between AOD and PM_{2.5}

Numerous studies demonstrate a strong correlation between AOD values and ground-level PM_{2.5} concentrations, although the strength of this relationship varies based on geographical, meteorological, and land-use factors (Fig. 3 and Table 1). Meteorological conditions such as temperature, relative humidity, and wind speed significantly influence the correlation by affecting aerosol properties and atmospheric dispersion. Additionally, land-use characteristics—such as urban density, vegetation cover, and proximity to industrial zones—modulate local PM_{2.5} levels.

Incorporating these auxiliary variables (see Fig. 4) into predictive models has proven effective in enhancing the accuracy of PM_{2.5} estimations. For example, regression models integrating meteorological and traffic data achieved significantly improved performance compared to models relying solely on AOD data. However, the inclusion of too many auxiliary variables can lead to overfitting, reducing the model's generalizability. Balancing model complexity with predictive accuracy remains a key challenge in this domain.

Machine Learning Algorithms for PM_{2.5} Estimation

Machine learning (ML) methods have revolutionized the estimation of PM_{2.5} concentrations from AOD data by effectively capturing the complex, non-linear relationships between variables. Among these, ensemble learning models such as Random Forest (RF) and XGBoost have consistently outperformed traditional linear regression models due to their ability to handle high-dimensional data and mitigate biases. Deep learning techniques, including Convolutional Neural Networks (CNNs) and Long Short-Term Memory (LSTM) networks, have also shown promise, particularly in time-series predictions of PM_{2.5} levels. Studies comparing ML algorithms highlight the superior performance of ensemble models, especially when combined with feature

selection techniques to reduce input data redundancy. For instance, hybrid approaches that integrate RF and XGBoost have achieved R^2 values exceeding 0.9 in several case studies, indicating exceptional predictive power. Furthermore, the use of advanced optimization techniques, such as Bayesian optimization, has enhanced the performance of these models by fine-tuning hyperparameters.

Limitations and Challenges

Despite the advancements in ML-based $PM_{2.5}$ estimation, several challenges persist. The accuracy of these models is highly dependent on the quality of input data, which can be compromised by factors such as cloud cover, sensor limitations, and temporal mismatches between satellite observations and ground measurements. Additionally, the variability in meteorological conditions introduces uncertainties that are difficult to account for, particularly in regions with complex topography. Another limitation is the reliance on high-resolution satellite imagery, which is often expensive and not readily available for all regions. Addressing these challenges requires integrating data from multiple sources, including ground-based sensors, satellite datasets, and meteorological models. The development of robust data fusion techniques is essential for improving the scalability and reliability of $PM_{2.5}$ estimation models.

Potential Applications and Future Directions

Future research should focus on developing hybrid algorithms that combine the strengths of multiple ML techniques, such as deep learning and ensemble learning. These algorithms should be capable of handling diverse datasets, enhancing temporal and spatial resolution, and addressing data uncertainty. Additionally, integrating long-term climate change scenarios into these models could provide more comprehensive insights into the dynamics of air pollution.

Conclusion

This study underscores the utility of AOD as a proxy for estimating $PM_{2.5}$ concentrations and highlights the transformative potential of machine learning in enhancing the accuracy and scalability of air quality monitoring (please refer to Figs. 5 and 6). Ensemble learning models, particularly hybrid approaches, offer significant advantages in capturing the complex interactions between AOD and $PM_{2.5}$. However, addressing challenges related to data quality, meteorological variability, and scalability is crucial for realizing the full potential of these methods.



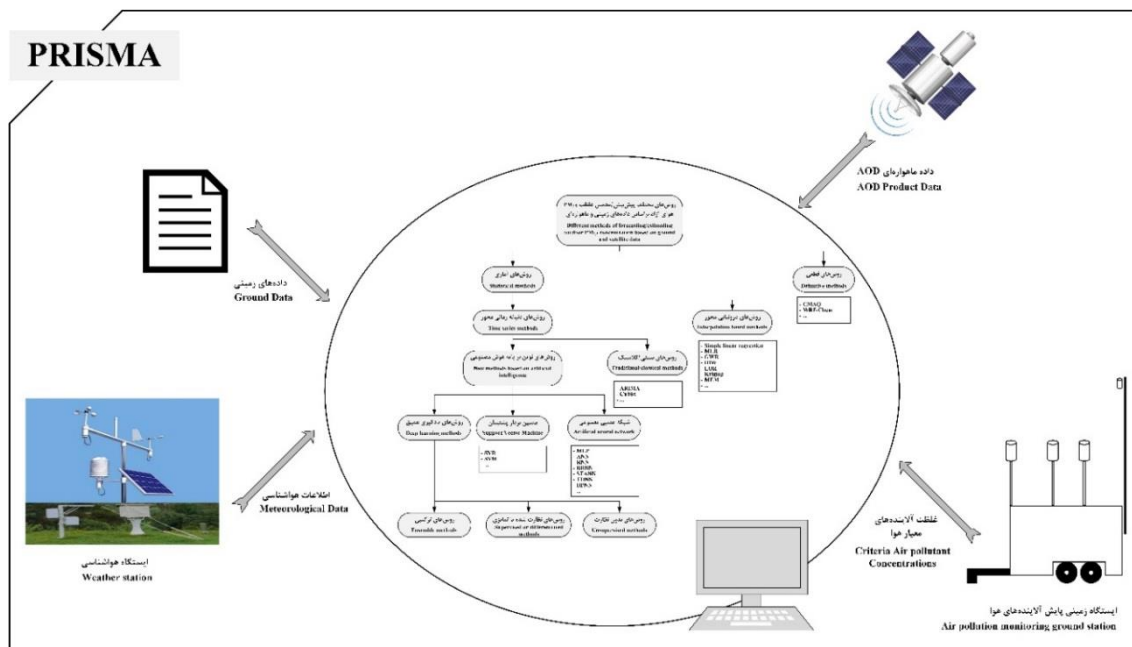
فراکاوای و مرور سیستماتیک ادغام داده‌های عمق نوری آئروسول برگرفته از ماهواره با یادگیری ماشین در برآورد غلظت ذرات معلق ریز ($PM_{2.5}$)

رسول طاهریان اصفهانی^۱، مهدی قنبرزاده لک^{*}

^۱گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله	قرار گرفتن در معرض ذرات ریز ($PM_{2.5}$) آلاینده هوا، به ویژه در مناطقی که میانگین سالانه آن از دستورالعمل‌های سازمان بهداشت جهانی فراتر است، به طور قابل توجهی بر سلامت عمومی تأثیر می‌گذارد. در ایران، افزایش سطح مواجهه با $PM_{2.5}$ ، به میزان قابل توجهی بر مرگ و میر درمیان بزرگسالان نقش داشته است. محدودیت‌های پوشش مکانی و شکاف مقطعی داده‌های ایستگاه‌های پایش زمینی، چالش‌هایی را در مدیریت مؤثر کیفیت هوا ایجاد نموده است. محصولات فناوری‌های سنجنش از دور، مانند عمق‌نوری آئروسول (AOD) برگرفته از حسگرهای MODIS، جایگزین امیدوارکننده‌ای در برآورد $PM_{2.5}$ به شمار می‌روند. در مقاله حاضر، تحقیقات پیشین در زمینه استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در برآورد غلظت $PM_{2.5}$ بر اساس داده‌های AOD، مرور شده است. تجزیه و تحلیل ساختاری ۱۲۷ مطالعه انتخاب شده، همبستگی‌های متفاوتی را بین AOD و $PM_{2.5}$ نشان داد (R^2 در محدوده ۰.۴۸ تا ۰.۹۹)، که می‌تواند با بهره‌گیری از متغیرهای کمکی نظیر شرایط هواشناسی و عوامل محیطی، بهبود یابد. اگرچه ادغام این متغیرها، دقت برآورد را افزایش می‌دهد، ولی در عین حال، پیچیدگی و خطاهای بالقوه را در مدل‌های یادگیری ماشین افزایش خواهد داد. مدل‌های یادگیری ماشین ترکیبی عملکرد بهتری را در مقایسه با الگوریتم‌های فردی نشان می‌دهند، چراکه قابلیت انطباق، پردازش موازی و مدیریت داده‌های ازدست رفته را دارند. علی‌رغم پیشرفت‌های اخیر، هنوز چالش‌هایی به دلیل عدم قطعیت داده‌ها و دینامیک بودن پدیده‌های هواشناسی، باقی مانده‌اند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین، اگرچه ابزاری قوی در برآورد $PM_{2.5}$ بر اساس شاخص AOD ارائه می‌دهد، لیکن تحقیقات آتی در راستای رفع محدودیت‌ها و بهینه‌سازی عملکرد مدل متناسب با تغییرات محیطی، ضروری است.
کلمات کلیدی:	
ذرات $PM_{2.5}$	
عمق نوری آئروسول (AOD)	
یادگیری ماشین	
سنجنده MODIS	
یادگیری گروهی	
مدل‌های ترکیبی	
مرور سیستماتیک	
تأثیر بر سلامت عمومی	

چکیده تصویری



مقدمه

امروزه بحث آلودگی هوا به عنوان پیامدی از توسعه فرآیندهای صنعتی، تغییرات اقلیمی و افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی، به یکی از معضلات جدی زیست‌محیطی خصوصاً در شهرهای بزرگ تبدیل شده است (Abbas, Ekowati, Suhariadi & Fenitra, 2023; Bai, Wang, Ma & Lu, 2018; Bono et al., 2015; Izah, Iyiola, Yarkwan & Richard, 2023; Jia, Li, Chen & Yang, 2023; West et al., 2016; Lu, Li, Li & Al-Barakani, 2021). بگونه‌ای که در سطح جهانی، به عنوان هشتمین عامل خطر و در کشور ایران به عنوان هفتمین عامل خطر با بالاترین تعداد مرگ و میر سالانه، شناخته می‌شود (Institute for Environmental Research, 2019). طرح‌ریزی و اجرای اقدامات حفاظتی کیفیت هوای آزاد، با پیش‌گیری از به مخاطره افتادن سلامتی افراد در معرض (به عنوان نیروی محرکه توسعه صنعتی) و در نتیجه کاهش غیبت افراد در محیط کاری و جلوگیری از کاهش بهره‌وری فردی کارکنان، منجر به رشد و شکوفایی اقتصادی جوامع خواهد شد. از دیدگاه روان‌شناختی، آلودگی هوا یکی از دلایل اصلی ایجاد اضطراب در رابطه با سلامتی و آینده، کاهش شادکامی، افزایش افسردگی و بروز اختلالات روانی همچون اسکیزوفرنی و اوتیسم می‌باشد. در عین حال، به لحاظ شناختی، آلودگی هوا می‌تواند عملکرد تصمیم‌گیری افراد را تحت تأثیر قرار داده و از نقطه نظر اجتماعی، منجر به تشدید رفتارهای مجرمانه و غیر اخلاقی گردد (Lu, 2020). به بیان دیگر، آلودگی هوا نه تنها سلامت افراد، بلکه سلامت جامعه را نیز به مخاطره می‌اندازد.

دسته‌بندی آلاینده‌های هوا (قابل شناسایی در هوای آزاد یا در گاز خروجی از منابع ساکن و متحرک) براساس دیدگاه‌های مختلفی همچون ترکیب شیمیایی گونه‌ها، ویژگی‌های واکنش‌پذیری، خصوصیات پراکنش در هوا، پایداری در محیط، توانایی انتقال در مسافت‌های کوتاه یا طولانی و اثرات تدریجی بر سلامتی انسان و/یا حیوانات، انجام می‌شود. با این وجود و با در نظر گرفتن برخی خصوصیات مشابه، آلاینده‌های هوا را می‌توان در چهار طبقه کلی (۱) آلاینده‌های گازی (مانند دی اکسید گوگرد، منوکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن، اُزن و ترکیبات آلی فرار)؛ (۲) آلاینده‌های آلی دیرپا^۱ (همچون دی‌اکسین‌ها و فیورن‌ها)^۲؛ (۳) فلزات سنگین (نظیر سرب و جیوه)؛ و (۴) ذرات جامد معلق (که در ادبیات فنی در دو دسته کلی $PM_{2.5}$ و PM_{10} طبقه‌بندی می‌شوند)؛ دسته‌بندی نمود (Kampa & Castanas, 2008). در این بین، آلاینده‌های معیار کیفیت هوای آزاد، ترکیباتی را شامل می‌شوند که اولاً حضور آنها در هوای آزاد شهری متداول بوده و ثانیاً سطوح قابل قبولی از قرار گرفتن در معرض آنها توسط استانداردهای کیفیت هوای آزاد، تعیین شده است. براساس استانداردهای سازمان حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا، این آلاینده‌ها شامل اُزن، منوکسید کربن، سرب، دی‌اکسید گوگرد، دی‌اکسید نیتروژن و ذرات معلق، می‌باشند (U.S. EPA, 2024). ذرات معلق با قطر آئروپنایمیک مساوی یا کمتر از $2.5 \mu m$ ($PM_{2.5}$)، از آلاینده‌های مهم کیفیت هوای آزاد محسوب می‌گردند و قادرند از طریق دستگاه تنفسی انسان، وارد جریان خون شوند. اثرات استنشاق $PM_{2.5}$ از ساده‌ترین حالات آلرژی تا بیماری‌های قلبی-عروقی و همچنین افزایش خطر مبتلا شدن به بیماری‌های سرطانی، متغیر است (Bell, Dominici, Ebisu, Zeger & Samet, 2007; Chen et al., 2021; Chudnovsky et al., 2013; Feng, Li, Wang & Du, 2020; Li, Yu, Huang, Sun & Jia, 2023; Moryani, Kong, Du & Bao, 2020; Nabavi, Haimberger & Abbasi, 2019; Osimobi, Yorkor & Nwankwo, 2019; Perrone et al., 2013; Pope III & Dockery, 2006; Saeed, Hussain, Awan & Idris, 2017; Xiao et al., 2017; Xue et al., 2022; Yan, Zang, Luo, Jiang & Li, 2020; Kelly & Fussell, 2012; Institute for Environmental Research, 2019; He & Huang, 2018).

مطالعات اخیر نشان دادند که در ایران، سالانه حدود ۷۵ هزار مرگ و میر (بین ۶۲ تا ۸۶ هزار) به دلیل قرار گرفتن افراد در معرض ذرات معلق محیطی $PM_{2.5}$ است (یعنی چیزی حدود ۲۴ درصد از کل مرگ و میر سالانه افراد بالای ۲۵ سال در ایران). بر اساس میانگین وزنی-جمعیتی سالانه، در ایران غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ در هوای آزاد (که افراد در معرض آن می‌باشند)، حدود $48 \mu g m^{-3}$ برآورد می‌شود که نسبت به میانگین جهانی آن (یعنی $51 \mu g m^{-3}$) کمی پایین است؛ اما با این وجود، همچنان قریب به $4/8$ برابر بیشتر از سطح توصیه شده توسط سازمان بهداشت جهانی (WHO)^۵ یعنی $10 \mu g m^{-3}$ و تقریباً چهار برابر بیشتر از استاندارد ملی است (Institute for Environmental Research, 2019). بنابراین ضروری است که میزان این ذرات به طور مستمر اندازه‌گیری و در خصوص کنترل غلظت آن، مراقبت شود (Xu, Chen, Yang, Tang & Dong, 2021).

1 Persistent organic pollutants

2 Dioxins and Furans

3 Particulate Matter less than 2.5 micrometers in aerodynamic diameter ($PM_{2.5}$)4 Particulate Matter less than 10 micrometers in aerodynamic diameter (PM_{10})

5 World Health Organization (WHO)

اندازه‌گیری ساعتی و روزانه غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ در هوای آزاد شهری توسط ایستگاه‌های زمینی پایش کیفیت هوا و پیش‌بینی شرایط آتی آن، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. با این حال، پوشش مکانی ایستگاه‌های پایش زمینی محدود بوده و در مواقعی از سال، ممکن است بدلیل نیاز به واسنجی تجهیزات یا مسائل نگهداری، از مدار خارج شوند. علاوه بر آن، تعداد اندک ایستگاه‌های زمینی پایش کیفیت هوای نصب شده در شهرهای کوچک، امکان پاسخگویی مناسب قبل از وقوع رخداد آلودگی هوا را تا حد زیادی محدود نموده است. در سالیان اخیر تلاش‌هایی در راستای بهره‌گیری از تکنولوژی‌های سنجنش از دور به عنوان ابزاری جایگزین، صورت گرفته و بدین ترتیب می‌توان پوشش گسترده‌تر فضایی و زمانی از غلظت آلاینده‌های هوا جهت اقدامات پیشگیرانه در دسترس داشت (Chudnovsky et al., 2013; Hu, Liebens & Rao, 2011).

یکی از پارامترهای اصلی برآورد غلظت آلاینده‌های PM در هوای آزاد براساس تکنولوژی‌های سنجنش از دور، عمق نوری آئروسول (AOD)^۱ است که از طریق تصاویر ماهواره‌ای بدست می‌آید و در مطالعات پیشین به طور گسترده‌ای از آن بهره‌برداری شده است (Meng et al., 2016; Li, Ma, Xu & Song, 2018b). شاخص AOD معیار مناسبی در برآورد میزان ذرات معلق موجود در جو است که بر اساس نسبت امواج خورشیدی وارد شده و جذب‌شده توسط اتمسفر (به علت تعامل با ذرات) و طول مسیر طی‌شده، محاسبه می‌گردد. AOD بطور معمول در یک ستون عمودی از هوا تعیین شده و داده‌های تولیدی توسط سنجنده MODIS^۲ به طور گسترده‌ای، بدین منظور مورد استفاده قرار گرفته است (Taheri Shahraini & Sodoudi, 2016; Mao, Qiu, Kusano & Xu, 2012). الگوریتم اهداف تیره (DT)^۳ و الگوریتم آبی عمیق (DB)^۴، دو الگوریتم متداول در بازیابی ویژگی‌های آئروسول از محصول تصحیح اتمسفری سنجنده MODIS به شمار می‌روند (Nabavi et al., 2019).

الگوریتم DT توسط کافمن و همکاران (Kaufman et al., 1997) معرفی شد. DT از این مفهوم فیزیکی الهام گرفته است که ذرات معلق در هوا از سطوح تاریک‌تر زمین مانند جنگل‌ها و سطح اقیانوس‌ها، روشن‌تر هستند. به دلیل محدودیت این الگوریتم در شناسایی ذرات معلق خصوصاً در مناطق شهری و بیابانی که دارای سطوح روشن می‌باشند، بازیابی دقیق ذرات معلق، یک چالش بزرگ بوده است. همین موضوع سبب شد تا هسو و همکاران (Hsu, Tsay, King & Herman, 2004)، الگوریتم دیگری به نام DB را بر روی تصاویر ماهواره‌ای MODIS با تفکیک‌پذیری ۱۰ کیلومتری پیاده‌سازی کنند. در الگوریتم اخیر از باند طول موجی ۴۱۲ نانومتر استفاده شد که آبی عمیق نام دارد و در آن آئروسول‌ها از هر نوع سطح زمینی، روشن‌تر هستند (Nabavi et al., 2019).

هدف اصلی در مقاله مروری حاضر، بررسی الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین بکار رفته در برآورد غلظت ذرات معلق ریز با استفاده از داده‌های AOD و میزان تطابق آنها با نتایج پایش‌های زمینی است. با توجه به نوبا

1 Aerosol Optical Depth (AOD)

2 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

3 Dark Target (DT)

4 Deep Blue (DB)

بودن کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در این شاخه از علوم و با عنایت به این موضوع که برخی روش‌های سنتی نیز در برآورد غلظت $PM_{2.5}$ از داده‌های AOD تاکنون مورد استفاده قرار گرفته اند، دامنه مطالعه مروری حاضر قدری گسترده‌تر انتخاب شد و مقالات و مستندات^۱ که به بررسی همبستگی ما بین غلظت $PM_{2.5}$ زمینی و داده‌های AOD با یا بدون بهره‌گیری از یادگیری ماشین پرداخته بودند، مورد توجه قرار گرفتند.

لازم بذکر است در مطالعات مروری، روش‌های مختلفی جهت گردآوری و تحلیل اطلاعات وجود دارد. مرور سنتی^۱ به مرور کلی مطالعات می‌پردازد و معمولاً فاقد ساختار دقیق و روش‌شناسی مشخص است؛ این روش بیشتر برای مطالعات مقدماتی مناسب بوده و ممکن است شامل سوگیری شود. مرور سیستماتیک^۲ با استفاده از رویکردی ساختاریافته و منظم، به شناسایی و ارزیابی مطالعات مرتبط با یک سؤال پژوهشی خاص می‌پردازد و برای ارائه نتایج دقیق‌تر و جامع، طراحی شده است. مرور دامنه‌ای^۳ نیز برای شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی و ارزیابی گستردگی موضوعی پژوهش‌ها به کار می‌رود، اما برخلاف مرور سیستماتیک، بر کیفیت مطالعات تأکید کمتری دارد. علاوه بر این، متا-آنالیز^۴ یا فراکاوی یک روش کمی است که داده‌های آماری مطالعات مختلف را ترکیب کرده و نتایج جامع و قابل اعتمادی ارائه می‌دهد.

بدین منظور و در مطالعه مروری حاضر، از روش مرور ساختاریافته و فراکاوی (PRISMA)^۵ بهره‌گیری گردید. این رویکرد به دلیل ساختار دقیق و منظم خود، امکان شناسایی و ارزیابی مطالعات مرتبط را فراهم می‌کند و با بهره‌گیری از تکنیک‌های آماری، نتایج مطالعات پیشین را تحلیل و خلاصه‌سازی می‌نماید. مزیت اصلی این روش نسبت به روش‌های دیگر، دقت بالا در استخراج اطلاعات، کاهش سوگیری و ارائه یک دیدگاه جامع و مستند از یافته‌های پژوهش‌های پیشین است. این ترکیب، به ویژه در پژوهش‌های مبتنی بر داده‌های کمی، نتایجی قوی‌تر و قابل اعتمادتر فراهم می‌آورد. کانون توجه در استخراج نتایج از مقالات و مستندات بر سه محور (۱) تعیین عوامل مؤثر بر ایجاد همبستگی معنی‌دار از نقطه نظر آماری بین داده‌های AOD، که از طریق تصاویر ماهواره‌ای بدست می‌آید و داده‌های $PM_{2.5}$ حاصل از پایش زمینی؛ (۲) میزان موفقیت تحقیقات پیشین در ایجاد همبستگی فوق براساس شاخص‌های آماری؛ و نهایتاً (۳) الگوریتم‌های یادگیری ماشین بکار رفته؛ متمرکز بوده است.

روش تحقیق

مقالات مبتنی بر روش مرور ساختاریافته و فراکاوی، از این جهت که متخصصان با بهره‌گیری از آنها قادر خواهند بود تا در زمینه تخصصی خود به‌روز باشند، دارای اهمیت قابل توجهی است. اساس کار در این روش، بررسی سؤال یا مسأله‌ای مشخص و معین بوده و بدین منظور از الگوریتم‌های ساختار یافته و صریح در شناسایی، انتخاب و ارزیابی منصفانه مطالعات مرتبط استفاده می‌نماید. در نهایت، با گردآوری و تجزیه و تحلیل نتایج

1 Traditional Review

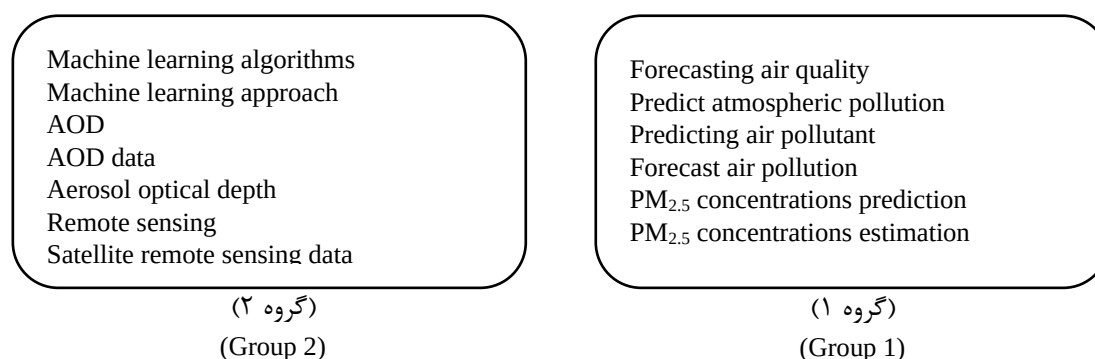
2 Systematic Review

3 Scoping Review

4 Meta-Analysis

5 Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA)

مطالعات پیشین طی جداول و اشکال (فراکاوی)، خلاصه‌ای از پیشرفت‌های پیشین حاصل شده در شاخه مورد تحقیق، به خوانندگان ارائه خواهد شد. به بیان دیگر، فراکاوی با استفاده تکنیک‌های آماری به تجزیه و تحلیل و خلاصه‌سازی نتایج مطالعات پیشین می‌پردازد (Moher, Liberati, Tetzlaff, Altman & PRISMA Group, 2009). در این مطالعه، از رویکرد PRISMA برای شناسایی، غربالگری و انتخاب مقالات مرتبط استفاده شده است. برای جستجوی مطالعات پیشین، مستندات منتشر شده در پایگاه‌های اطلاعاتی PubMed، Google Scholar و Science Direct مورد بررسی قرار گرفت. جستجوی مدارک با ترکیب دو گروه از کلمات کلیدی مرتبط با موضوع، پی‌گیری گردید. بگونه‌ای که گروه اول شامل کلید واژه‌های توصیف کننده برآورد آلودگی هوا بوده و گروه دوم، کلید واژه‌های مربوط به یادگیری ماشین و سنجش از دور را شامل می‌شدند. جستجوی مدارک با استفاده از کلید واژه‌های انگلیسی و با ترکیب احتمالی کلمات مهم، اصلی و حساس، انجام شد. بدین منظور، کلید واژه‌های منتخب به همراه عملگرهای AND و OR، در بخش‌های عنوان، کلمات کلیدی و چکیده مدارک، جستجو شدند. واژگان کلیدی که در جستجوی مقالات مورد استفاده قرار گرفتند، در شکل (۱) آورده شده است.

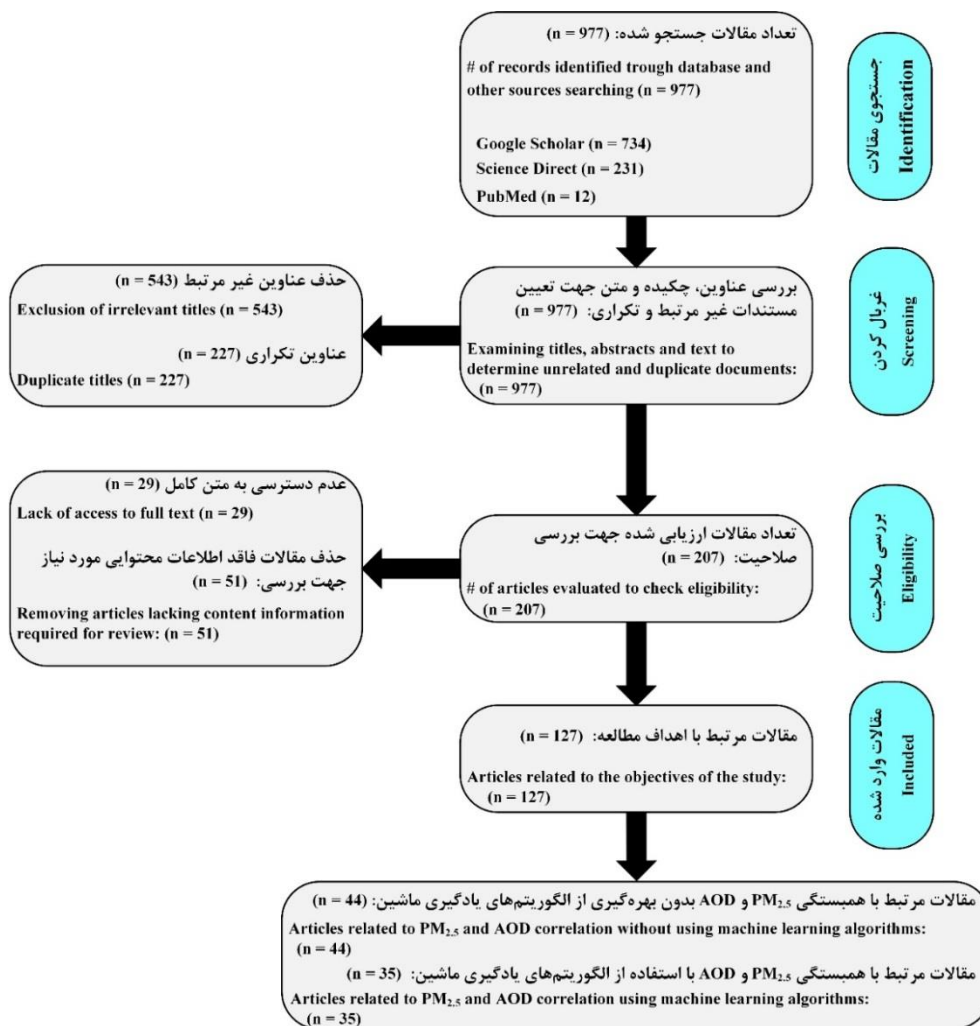


شکل ۱- واژگان کلیدی مورد استفاده در جستجوی مقالات

Fig.1. Keywords Used in Article Searches

در مرحله اول عملیات جستجو، مقالاتی انتخاب شدند که در آنها وجود همبستگی و شدت آن بین داده‌های AOD ماهواره‌ای و مقادیر پایش شده زمینی PM_{2.5}، با/بدون استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، مورد مطالعه قرار گرفته بود. در بررسی اولیه سه پایگاه داده فوق الذکر، در کل ۹۷۷ مقاله حائز شرایط این تحقیق تا تاریخ ۱۹ آوریل ۲۰۲۴ (۳۱ فروردین ۱۴۰۳)، به دست آمد. سپس عنوان و چکیده تمامی مقالات، مستندات و گزارش‌های منتخب در مرحله اول، استخراج و با بررسی محتوای آن‌ها، موارد تکراری حذف شدند. بر اساس بررسی عناوین و چکیده‌ها، تعداد زیادی از منابع حذف گردیدند. محتوای مقالات باقی‌مانده به طور دقیق مورد مطالعه قرار گرفت و منابع کاملاً مرتبط، انتخاب شدند. در نهایت بر اساس عنوان، نویسنده اصلی، سال انتشار، نوع الگوریتم انتخابی و مشخصات دیگر، مستندات به صورت خلاصه در جدولی طبقه‌بندی گردیدند. بدین ترتیب

فرآیند جمع‌آوری و بررسی منابع پژوهشی به طور سیستماتیک انجام پذیرفت تا اطلاعات مفید برای پاسخ به سؤال پژوهش به دست آید. فرآیند جستجو، ورود و خروج مقالات، در شکل (۲) آورده شده است.



شکل ۲- فرآیند جستجو، ورود و خروج مقالات

Fig.2. The Process of Searching, Entering and Exiting Articles

نتایج و بحث

توسعه مدل‌های پیش‌بینی/ برآورد غلظت آلاینده‌های هوا در یک مکان خاص، ابزاری قدرتمند در طرح‌ریزی اقدامات پیشگیرانه همچون کنترل منابع پراکنش و هشداردهی به شهروندان در شرایط اضطراری را در اختیار مدیران شهری قرار می‌دهد (Cortina-Januchs, Quintanilla-Dominguez, Vega-Corona & Andina, 2015). به طور کلی، راهکارهای پیش‌بینی/ برآورد غلظت یک آلاینده در یک محیط براساس داده‌های پایش

پیشین همان آلاینده یا سایر آلاینده‌های معیار و اطلاعات محیطی، در دو دسته راهکارهای قطعی و آماری، تقسیم‌بندی می‌شوند (Bai et al., 2018).

مدل‌های کیفیت هوای چند مقیاسی جامعه (CMAQ)^۱ و پیش‌بینی عددی وضع هوای جفت شده با مباحث شیمی (WRF-Chem)^۲، از جمله پُرکاربردترین مدل‌های قطعی پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های هوا به شمار می‌روند (Kong, Xin, Zhang & Wang, 2016; Li et al., 2018b). این مدل‌ها با در نظر گرفتن عملکردهای فیزیکی شامل گسیل، پراکنش، انتقال و پخش آلاینده؛ درهم‌کنش‌های شیمیایی به وقوع پیوسته در جو را نیز شبیه‌سازی می‌نمایند (Geng et al., 2015; Van Donkelaar et al., 2010). با این وجود، از آنجا که بیشتر این مدل‌ها به دانش پیچیده‌ای درباره حالت پخش آلاینده و مسیرهای واکنش شیمیایی نیاز دارند، برآورد غلظت آلاینده PM_{2.5} از طریق آنها بسیار پیچیده و از لحاظ محاسباتی پُرهزینه خواهد بود (Stern et al., 2008).

در راستای رفع محدودیت‌های راهکارهای قطعی، از مدل‌های آماری در پیش‌بینی/برآورد آلودگی هوا بهره‌گیری شده است. این مدل‌ها خود در دو طبقه مدل‌های فضایی (مکانی) و مدل‌های دنباله زمانی، دسته‌بندی می‌شوند. در مدل‌های فضایی (مکانی) راهکارهایی که بر مبنای درونیابی عمل می‌کنند، تحت عنوان راهکارهای زمین آماری در مدل‌سازی آلودگی هوا شناخته شده و نمونه‌هایی از آنها شامل روش‌های رگرسیون خطی ساده (Wang & Christopher, 2003; Koelemeijer, Homan & Matthijsen, 2006)، رگرسیون خطی چندگانه (MLR)^۳ (Liu, Sarnat, Kilaru, Jacob & Koutrakis, 2005؛ Paciorek, Liu, Moreno-Macias & Fotheringham, Charlton & Brunson, 2008)، رگرسیون وزن دار جغرافیایی (GWR)^۴ (Kondragunta, 2008)، درونیابی وزنی وارونه (IDW)^۵ (Masroor et al., 2020)، رگرسیون کاربری اراضی (LUR)^۶ (Vicedo-Cabrera, Biggeri, Grisotto, Barbone & Catelan, 2013)، روش کریجینگ (Lee et al., 2015) و مدل اثر ترکیبی (MEM)^۷ (Lee, Coull, Bell, Schwartz & Koutrakis, 2011؛ Lee, Coull, Bell, Schwartz & Koutrakis, 2012) می‌باشند که در تحقیقات گذشته در برآورد مکانی آلودگی در یک زمان مشخص در سطح شهر، به کار رفته‌اند.

بخش دوم یعنی راهکارهای دنباله زمانی محور با هدف پیش‌بینی/برآورد آلودگی هوا، شامل روش‌های سنتی و روش‌های نوین می‌باشند. متداول‌ترین روش سنتی، مدل رگرسیونی میانگین متحرک یکپارچه خود هم‌بسته (ARIMA)^۸ است که در برآورد غلظت PM_{2.5} مورد استفاده قرار گرفته است (Hosseini & Shahbazi, 2016). از جمله محدودیت‌های روش‌های سنتی می‌توان به عدم عملکرد مؤثر این مدل‌ها در تجزیه و تحلیل و ادغام داده‌های چند منبعی مانند داده‌های هواشناسی، کاربری زمین و ترافیک، اشاره داشت که منجر به دقت اندک

1 the Community Multiscale Air Quality (CMAQ)

2 Weather Research and Forecasting model coupled to Chemistry (WRF-Chem)

3 Multi Linear Regression (MLR)

4 Geographically Weighted Regression (GWR)

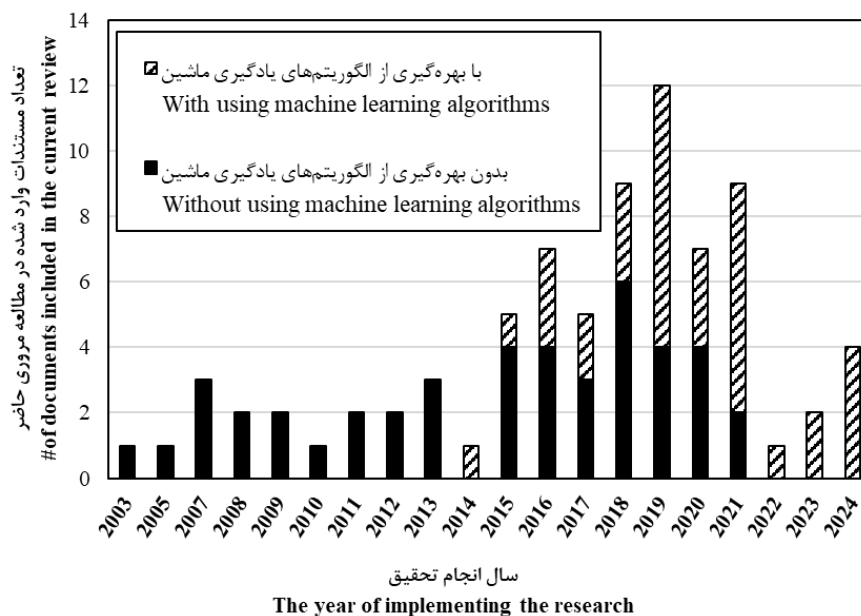
5 Inverse Distance Weighted (IDW)

6 Land Use Regression (LUR)

7 Mixed Effect Model (MEM)

8 AutoRegressive Integrated Moving Average (ARIMA)

آنها در برآوردها شده است. علاوه بر آن، روش‌های سنتی مدل‌سازی مبتنی بر دنباله زمانی نیازمند پیش‌فرض‌هایی همچون انتخاب یک توزیع خاص آماری و پذیرش خطی بودن مدل هستند که در صورت عدم برقراری این پیش‌فرض‌ها، نتایج مدل با خطای قابل توجهی همراه خواهد بود (Song, Qin, Qu & Liu, 2015). روش‌های نوین مبتنی بر دنباله زمانی در ادامه مورد بررسی بیشتر قرار خواهند گرفت. در شکل (۳) فراوانی مقالات وارد شده در مطالعه مروری حاضر براساس سال انتشار آنها آورده شده است. همانطور که از این شکل برمی‌آید، روند انتشار تحقیقات مرتبط با برآورد غلظت‌های زمینی PM_{2.5} براساس داده‌های ماهواره‌ای، در سالیان اخیر یک روند صعودی است.

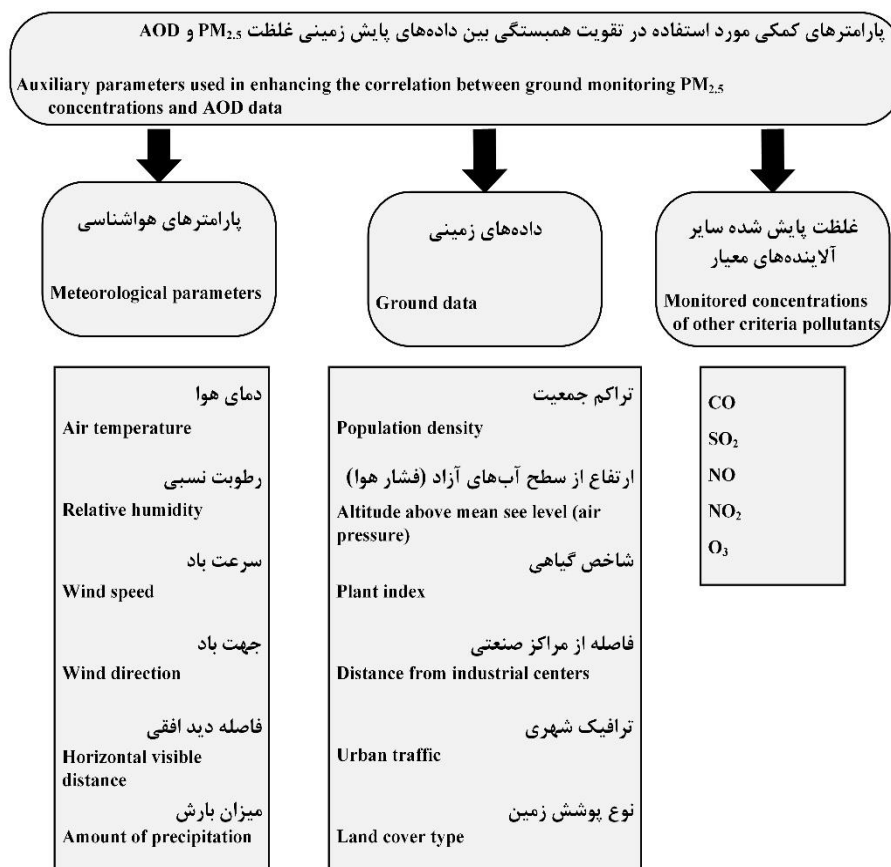


شکل ۳- فراوانی مقالات وارد شده در مطالعه مروری حاضر براساس سال انتشار

Fig.3. Frequency of Articles Included in the Current Review by Publication Year

در تعدادی از مطالعات بررسی شده در تحقیق حاضر، مقادیر بالای همبستگی بین غلظت PM_{2.5} زمینی و داده‌های AOD، مشاهده شده است. این امر قابلیت بالای استفاده از داده‌های AOD به عنوان برآوردگر مناسبی در تخمین غلظت PM_{2.5} زمینی را نشان می‌دهد (Beckerman et al., 2013; De Hoogh et al., 2016; Xue, Zhang, Zhong, Ji & Huang, 2020). با این وجود، برخی مطالعات نیز وجود همبستگی معنی‌دار بین PM_{2.5} و AOD را رد کرده یا شدت پایینی از همبستگی میان آنها را نشان داده‌اند. این مستندات، حصول همبستگی قوی‌تر بین PM_{2.5} و AOD را منوط به استفاده از متغیرهای دیگری همچون پارامترهای هواشناسی، دانسته‌اند. به بیان دیگر، از نظر تعدادی از محققان، برقراری ارتباط مطمئن میان PM_{2.5} و AOD، مستلزم بهره‌گیری از داده‌های کمکی بیشتری است (Kong et al., 2016; Han & Tong, 2019; Jiang et al., 2021; Nabavi et

Yang et al., 2019؛ al., 2019). در شکل (۴) پارامترهای کمکی مورد استفاده در تقویت همبستگی بین داده‌های غلظت $PM_{2.5}$ پایش شده زمینی و داده‌های AOD آورده شده است.



شکل ۴- پارامترهای کمکی در تقویت همبستگی بین داده‌های غلظت $PM_{2.5}$ و AOD

Fig.4. Auxiliary Parameters Enhancing the Correlation Between $PM_{2.5}$ Concentration and AOD Data

هو و همکاران (Hu et al., 2013)، بر این باور بودند که استفاده صرف از محصولات ماهواره‌ای ممکن است منجر به خطاهای برآورد در نتایج شود. ایشان در جهت رفع این خطاها پیشنهاد نمودند که علاوه بر AOD، از پارامترهای محلی نظیر متغیرهای پوشش زمین و پارامترهای هواشناسی، به عنوان ورودی‌های کمکی در مدل رگرسیون استفاده شود. آنها به این نتیجه رسیدند که ورود این پارامترهای کمکی می‌تواند عملکرد مدل رگرسیون خطی در برآورد غلظت $PM_{2.5}$ را بهبود بخشد. یانگ و همکاران (Yang et al., 2019)، مشاهده کردند که در مناطق خشک مانند شمال چین، همبستگی بین $PM_{2.5}$ و AOD بیشتر است؛ در حالی که در مناطق ساحلی، این همبستگی ضعیف‌تر بدست آمد. آنها عواملی همچون توپوگرافی سطحی و پارامترهای هواشناسی را بر تغییرات زمانی و مکانی رابطه بین $PM_{2.5}$ و AOD مؤثر دانستند. در مطالعه‌ای دیگر، وایی و همکاران (Yi et al., 2019)، به برآورد غلظت $PM_{2.5}$ در استان‌های شمالی چین پرداختند. آنها دریافتند که شرایط آب و

هوایی گوناگون در منطقه مورد مطالعه، تغییرات مختلفی در شدت همبستگی غلظت $PM_{2.5}$ و AOD ایجاد نموده است و نتایج با مدل‌های بدست‌آمده از مناطق دیگر، تفاوت دارد. هوانگ و همکاران (Huang et al., 2019)، با استفاده از پارامترهای هواشناسی و ارتفاع از سطح دریاهای آزاد، ابتدا مقادیر گم‌شده AOD با تفکیک‌پذیری^۱ یک کیلومتر در شهر نیویورک را برآورد نموده و سپس با بهره‌گیری از داده‌های کمکی پوشش سطح، غلظت $PM_{2.5}$ را تخمین زدند. میری و همکاران (Miri, Ghassoun, Dovlati, Ebrahimnejad & Löwner, 2019)، در برآورد غلظت $PM_{2.5}$ در شهر سبزوار، از پارامترهای کمکی پوشش زمین، فاصله از خیابان و مناطق صنعتی و همچنین ارتفاع، استفاده کردند. برخلاف مطالعات قبلی، در این تحقیق از مقادیر AOD در برآورد غلظت $PM_{2.5}$ استفاده نشد. چن و همکاران (Chen, Wu, Tu & Cao, 2020)، از یک مدل رگرسیون خطی شامل پارامترهای هواشناسی، داده‌های مربوط به ترافیک، انواع پوشش زمین، جمعیت و داده‌های ارتفاعی در بازه زمانی زمستان ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۵ در کشور چین، به منظور برآورد غلظت $PM_{2.5}$ استفاده کردند. فنگ و همکاران (Feng et al., 2020)، در دو شهر پکن و چانگدو جهت برآورد غلظت $PM_{2.5}$ از مقادیر AOD ماهواره‌ای، از پارامترهای کمکی هواشناسی و متغیرهای پوشش سطح استفاده نمودند. آنها در این مطالعه موفق به دستیابی به ضریب تعیین R^2 برابر با ۰/۷۱ شدند. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2021)، عدم اطمینان موجود در برآورد $PM_{2.5}$ از نتایج مبتنی بر AOD را یک چالش جدی دانسته و با استفاده از پارامترهای هواشناسی و متغیرهای پوشش زمین، سعی نمودند این مشکل را حل کنند. در پژوهشی دیگر، جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2021)، بیان داشتند وقتی غلظت آئروسول در هوای آزاد بالا است، برآورد $PM_{2.5}$ صرفاً براساس AOD دچار خطا می‌شود. آنها برای حل این مشکل از پارامترهای هواشناسی علاوه بر داده‌های AOD استفاده نمودند. استفاده از داده‌های کمکی در تحقیقات دیگر محققان نیز مورد اشاره قرار گرفته است (Guo, Tang, Li et al., 2018 a, b; Liu, Franklin, Kahn & Koutrakis, 2018; Gong & Zhang, 2017; 2007; Liu, Paciorek & Koutrakis, 2009; Meng et al., 2016; Moore, Jerrett, Mack & Künzli, 2007; Qi, Li, Karimian & Liu, 2019; Ross, Jerrett, Ito, Tempalski & Thurston, 2007; Shi, Ho, Xu & Ng, 2018; Su et al., 2009; Wu et al., 2017; Zou, Fang, Feng & Zhou, 2021). در جدول (۱)، پارامترهای کمکی مورد استفاده توسط محققان در برآورد غلظت $PM_{2.5}$ از داده‌های AOD به همراه دقت ارزیابی، ارائه شده است. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مطالعات پیشین با استفاده از پارامترهایی نظیر دما، رطوبت نسبی، فشار سطحی و داده‌های تراکم جمعیت، به دقت‌های متنوعی دست یافته‌اند که نشان‌دهنده اهمیت ترکیب مناسب این پارامترها در بهبود دقت مدل‌ها است. همچنین، برخی مطالعات (به‌ویژه مطالعاتی که از داده‌های دقیق‌تر و متنوع‌تر استفاده کرده‌اند) موفق به کسب دقت بالاتری شده‌اند که نقش کلیدی انتخاب متغیرهای ورودی مناسب را تأیید می‌کند. این جدول علاوه بر نشان دادن تنوع متغیرهای به‌کاررفته، بر اهمیت استفاده از داده‌های محلی و تنظیمات خاص منطقه‌ای جهت بهبود پیش‌بینی $PM_{2.5}$ تأکید دارد.

جدول ۱- پارامترهای کمکی مورد استفاده در برآورد غلظت PM_{2.5} براساس داده‌های AOD به‌همراه

دقت نتایج

Table 1- Auxiliary Parameters Used in Estimating PM_{2.5} Concentrations from AOD Data with Accuracy Results

پارامترهای هواشناسی																	داده‌های زمینی							منطقه مورد مطالعه Study area
موضوع Reference	% R ²	AOD	Meteorological parameters										Ground data											
			شاخص کیفیت هوا Air quality index	فاصله دید افقی Horizontal visible distance	آب قابل بارش Precipitable water	دید Visibility	رطوبت نسبی نسبت باد Wind speed and direction	بارش Precipitation	فشار Pressure	دما Temperature	PM _{2.5}	PM ₁₀	نوع پوشش Land cover type	نوع کاربری Land use type	تراфик شهری Urban traffic	فاصله از مراکز صنعتی Distance from industrial centers	شاخص گیاهی Plant index	ارتفاع از سطح دریاها Height above sea level	تراکم جمعیت Population density					
Ayus et al., 2023	۹۹	✓	✓												✓	✓			چین (China)					
Reddy et al., 2018	۹۶	✓																	چین (China)					
Shoghrodae et al., 2021	۹۵	✓															✓		تهران (Tehran)					
Ren et al., 2024	۹۵	✓											✓						چین (China)					
Miri et al., 2019	۹۳													✓	✓		✓	✓	سبزوار (Sabzevar)					
Yang et al., 2024	۹۳	✓																	چین (China)					
Feng et al., 2020	۹۱	✓													✓				چین (China)					
Qi et al., 2019	۹۱	✓	✓										✓	✓					چین (China)					
Mohammadi et al., 2024	۹۰	✓																	تهران (Tehran)					
Chen et al., 2021	۸۹	✓			✓									✓	✓				چین (China)					
Liu et al., 2019	۸۹	✓																	چین (China)					
Huang et al., 2019	۸۵	✓															✓	✓	نیویورک (New York)					
Jiang et al., 2021	۸۵	✓		✓			✓										✓	✓	چین (China)					
Obodoze et al., 2021	۸۵	✓													✓				چین (China)					
Enebish et al., 2021	۸۳	✓																✓	مغولستان (Mongolia)					
Li et al., 2018b	۸۱																✓	✓	پکن (Beijing)					
Zhang et al., 2021	۸۱	✓	✓												✓	✓	✓	✓	چین (China)					
Ghaemi et al., 2016	۸۱				✓														تهران (Tehran)					
Zamani Joharestani et al., 2019	۸۱	✓		✓		✓													تهران (Tehran)					
Karimian et al., 2019	۸۰	✓																	تهران (Tehran)					
Aguilera et al., 2023	۷۸																	✓	آمریکا (USA)					
Chen et al., 2024	۷۸	✓															✓		چین (China)					
Yang et al., 2019	۷۷	✓															✓		منطقه ساحلی چین (Coastal region of China)					
Cortina-Jamachs et al., 2015	۷۷	✓															✓	✓	مکزیک (Mexico)					
Yi et al., 2019	۷۶	✓																	شمال چین (North China)					
Li et al., 2018a	۷۵	✓															✓	✓	شاندونگ (Shandong)					
Chen et al., 2020	۷۱																✓		جنوب چین (South China)					
Zhang et al., 2018	۶۸	✓		✓													✓	✓	تگزاس (Texas)					
Nahvi et al., 2019	۶۸	✓		✓			✓											✓	تهران (Tehran)					
Yan et al., 2020	۶۳																	✓	چین (China)					
Hu et al., 2013	۶۱	✓																✓	آمریکا (USA)					
Kong et al., 2016	۵۸	✓																	پکن (Beijing)					
Xu et al., 2018	۴۸	✓															✓	✓	کانادا (Canada)					

نکته دیگری که در اینجا حائز اهمیت است، احتمال بروز خطای بیش‌برازش^۱ در صورت استفاده از تعداد زیادی از پارامترهای کمکی در یک مدل است. هرچه تعداد پارامترهای قابل تنظیم در یک مدل بیشتر باشد، مدل پیچیده‌تر می‌شود و توانایی بیشتری برای یادگیری الگوهای بسیار خاص و جزئی در داده‌های آموزشی پیدا می‌کند. این امر باعث می‌شود مدل به شدت به داده‌های آموزشی وابسته شده و در مواجهه با داده‌های جدید که ممکن است اندکی متفاوت باشند، عملکرد ضعیفی از خود نشان دهد. به عبارت دیگر، یک مدل با پارامترهای کمکی زیاد، می‌تواند به راحتی داده‌های آموزشی را حفظ کند، اما این حفظ کردن به معنای یادگیری واقعی نیست. در واقع، مدل به جای یادگیری قوانین کلی حاکم بر داده‌ها، صرفاً جزئیات تصادفی و نویزهای موجود در داده‌های آموزشی را یاد می‌گیرد. این پدیده شبیه به این است که یک دانش‌آموز به جای درک مفاهیم اصلی یک درس، فقط به حفظ کردن متن کتاب بسنده کند. در نتیجه، زمانی که با سؤالی روبرو می‌شود که کمی

1 Overfitting

متفاوت از متن کتاب باشد، قادر به پاسخگویی نخواهد بود. بنابراین، افزایش تعداد پارامترهای کمکی بدون کنترل، می‌تواند به طور مستقیم به افزایش خطر بیش برآزش منجر شود. برای جلوگیری از این مشکل، روش‌های مختلفی مانند منظم‌سازی^۱، کاهش ابعاد داده‌ها و انتخاب ویژگی‌های مهم و استفاده از تکنیک‌های توقف زود هنگام، به کار می‌روند (Karimian et al., 2019).

همانطور که قبلاً گفته شد، در سالیان اخیر از روش‌های نوین مبتنی بر دنباله زمانی در برآورد غلظت PM_{2.5} از داده‌های AOD بهره‌برداری شده است. این روش‌ها شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)^۲، الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین همچون رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)^۳ و یادگیری عمیق (Lai, Li & Pan, 2021 ; Li et al., 2023 ; Peng, Wang, Xia & Gao, 2022) و روش‌های یادگیری جمعی نظیر جنگل تصادفی (RF)^۴ و تقویت گرادیان، می‌شوند. با توجه به وجود رابطه غیرخطی بین PM_{2.5} و متغیرهای پیش‌بینی کننده، روش‌های مذکور به دلیل توانایی قابل توجه در انتخاب و مدیریت تعداد زیادی متغیر مستقل و امکان تحلیل مسائل پیچیده‌تر، بسیار مورد توجه محققان بوده اند. در شکل (۵) نمودار فراوانی استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در برآورد غلظت PM_{2.5} براساس داده‌های AOD، آورده شده است. لازم بذکر است مبنای استخراج شکل (۵)، کلیه الگوریتم‌های بهره‌گیری شده توسط محقق در مستند انتشار یافته بوده؛ لیکن از نقطه نظر معرفی بهترین الگوریتم جهت انجام برآوردها، روش‌های ترکیبی یا Ensemble Model با فراوانی نه، جنگل تصادفی با فراوانی هفت؛ و XGboost با فراوانی سه؛ به ترتیب در جایگاه‌های اول تا سوم قرار می‌گیرند. استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، انجام پیش‌بینی‌های دقیق در مسائل تحلیل پیشرفته داده‌ها را امکان‌پذیر نموده است (Vapnik, 2013). این روش‌ها مبتنی بر کرنل^۵ بوده و در تحقیقات با هدف پیش‌بینی دنباله زمانی (Das Chagas Moura, Zio, Lins & Droguett, 2011; Quan, Liu & Liu, 2010; Sapankevych & Ghaemi, Farnaghi & Alimohammadi, 2016) و پیش‌بینی آلودگی هوا (Sankar, 2009; Tay & Cao, 2001) به کار گرفته شده‌اند.

همانطور که از شکل ۵ برمی‌آید، الگوریتم‌های متنوعی در زمینه ایجاد همبستگی بین داده‌های زمینی پایش PM_{2.5} و اطلاعات برگرفته از ماهواره (AOD) به کار گرفته شده است، اما میزان استفاده از هر الگوریتم به شدت متغیر است. الگوریتم‌هایی مانند Random Forest (RF) و XGBoost با بیشترین فراوانی در صدر جدول قرار دارند. این امر نشان می‌دهد که این الگوریتم‌ها به دلیل دقت و کارایی بالای خود در برآورد پارامترهای پیچیده و محیطی مانند غلظت PM_{2.5}، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. در مقابل، برخی الگوریتم‌ها با فراوانی کمتر استفاده شده‌اند که ممکن است به دلیل محدودیت‌های این الگوریتم‌ها در مدل‌سازی داده‌های غیرخطی و پیچیده باشد. به طور کلی، نمودار حاکی از روند رو به رشد استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر و ترکیبی در

1 Regularization

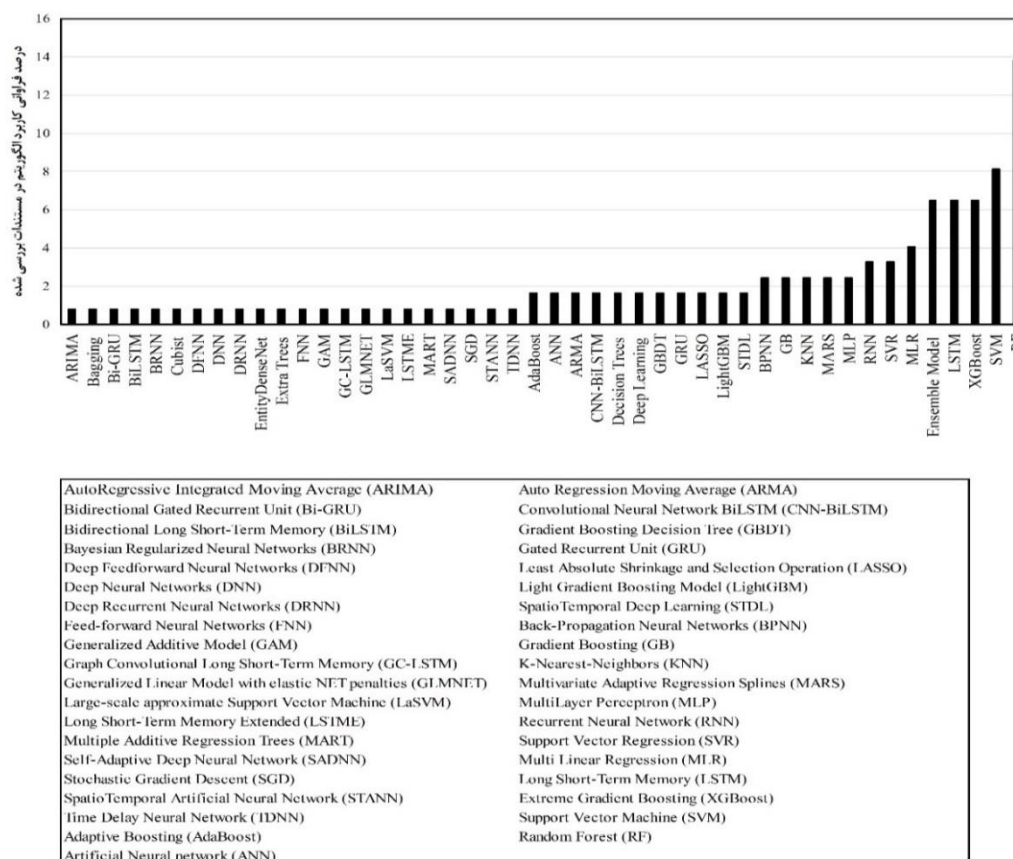
2 Artificial Neural network (ANN)

3 Support Vector Regression (SVR)

4 Random Forest (RF)

5 Kernel

مدل‌سازی پدیده‌های محیطی است که به مرور جایگزین روش‌های ساده‌تر شده‌اند. این توزیع همچنین نشان‌دهنده علاقه پژوهشگران به استفاده از الگوریتم‌های انعطاف‌پذیر و توانمند در پردازش داده‌های حجیم و پیچیده می‌باشد.



شکل ۵- فراوانی کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در برآورد غلظت $PM_{2.5}$

Fig.5. Frequency of Machine Learning Algorithm Applications in Estimating $PM_{2.5}$ Concentrations

مدل ماشین بردار پشتیبان نه تنها به صورت مستقل در پیش‌بینی‌های مبتنی بر دنباله زمانی استفاده شده است، بلکه در ترکیب با روش‌های دیگر نیز می‌تواند سری‌های زمانی پیچیده و نامان را مدل‌سازی نماید. ژو و همکاران (Zhou et al., 2019)، این مدل را در ترکیب با روش‌های دیگر بکار برده و با استفاده از متغیرهای غلظت آلاینده‌های هوا، پارامترهای هواشناسی و داده‌های ترافیکی، به پیش‌بینی مکانی-زمانی آلودگی در چند ساعت آینده، پرداختند. با این حال، شبکه‌های ماشین بردار پشتیبان با وجود توانایی بالا در حل مسائل پیچیده، با محدودیت‌هایی نیز روبرو می‌باشند. به طوری که با افزایش حجم داده‌های ورودی، زمان پردازش نیز افزایش یافته و همچنین قادر به حفظ اطلاعات در دنباله زمانی نیستند و در پیش‌بینی‌هایی در چند گام جلوتر، شبکه با کاهش دقت مواجه می‌شود (Han, Zhao, Leung, Ma & Wang, 2019).

اوبودوئز و همکاران (Obodoeze, Nwabueze & Akaneme, 2021)، جهت برآورد غلظت $PM_{2.5}$ در فاصله زمانی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۳، از نه روش رگرسیون خطی چندگانه شامل رگرسیون بردار پشتیبان، رگرسیون خطی چندگانه، شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه، درخت تصمیم، درخت تصمیم تقویت شده با AdaBoost^۱، جنگل تصادفی، XGBoost^۲، Extra Trees و رگرسیون LASSO^۳، در شهر پکن، چین، استفاده کردند. نتایج نشان دهنده عملکرد بهتر مدل XGBoost نسبت به سایر مدل‌ها بود.

شبکه‌های عصبی یکی دیگر از مدل‌های متداول در پیش‌بینی‌های مبتنی بر دنباله زمانی هستند. این شبکه‌ها با پیشینه‌ای حدود ۷۰ ساله، با موفقیت در حل مسائل مربوط به رگرسیون، طبقه‌بندی و استخراج ویژگی‌ها استفاده شده‌اند. وانگ و همکاران (Wang, Zeng & Chen, 2015)، لچترمچر و فولر (Lachtermacher & Fuller, 1995)، مللیت و پاون (Mellit & Pavan, 2010) و میشر و گوپال (Mishra & Goyal, 2015)، برای پیش‌بینی دنباله‌های زمانی و آلودگی هوا، از این روش استفاده کردند. در مطالعه‌ای دیگر، هان و همکاران (Han et al., 2019)، متوجه ضعف عملکرد شبکه عصبی در برابر مسائل پیچیده با حجم انبوه ورودی شدند که می‌تواند منجر به کاهش عملکرد شبکه و عدم توانایی در تقریب توابع پیچیده شود.

یادگیری عمیق، روشی جدید در حوزه یادگیری ماشین است که در سالیان اخیر در بخش هوش مصنوعی معرفی شده و قادر است الگوهای مرتبط با خصوصیات بسیار پیچیده را با استفاده از حجم بزرگی از داده‌های ورودی تشخیص دهد (Deng & Yu, 2014; Yamins & DiCarlo, 2016). در مقایسه با روش‌های سنتی، یادگیری عمیق می‌تواند به طور کارآمد، مدلی را از داده‌های آموزشی استخراج کرده و پیش‌بینی دقیق‌تری را ارائه دهد (Zhang, Zheng & Qi, 2017; Meyer, Kühnlein, Appelhans & Nauss, 2016). با گسترش استفاده از یادگیری عمیق در موضوعات متنوع، بررسی پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های هوای شهری با استفاده از یادگیری عمیق در سال‌های اخیر مورد توجه ویژه محققان بوده است (Kuremoto, Kimura, Kobayashi & Obayashi, 2014; Zuo, Guo, Shi & Zhang, 2020). یادگیری عمیق می‌تواند از حجم بالای داده بهره برده و رابطه‌های پیچیده بین داده‌ها را از طریق آموزش کارآمد، شناسایی کند (Schmidhuber, 2015).

راهکارهای یادگیری عمیق در حوزه پیش‌بینی، مبتنی بر دنباله زمانی، شامل سه دسته اصلی (۱) بدون نظارت (مانند شبکه خود رمزنگار)؛ (۲) نظارت شده یا تمایزی (مانند شبکه‌های کانولوشنی و بازگشتی)؛ و (۳) یادگیری ترکیبی است (Sarker, 2021). لو و همکاران (Lv, Duan, Kang, Li & Wang, 2014) و لی و همکاران (Li, Peng, Hu, Shao & Chi, 2016)، از شبکه‌های خود رمزنگار جهت پیش‌بینی دنباله زمانی مانند پیش‌بینی جریان ترافیک و پیش‌بینی مصرف انرژی در ساختمان، استفاده کردند. در یک پژوهش در کشور ژاپن با هدف پیش‌بینی غلظت $PM_{2.5}$ با استفاده از شبکه‌های خود رمزنگار عمیق، یک روش نوین پیش آموزش شبکه پویا برای داده‌های سری زمانی توسعه یافت. در این تحقیق، از داده‌های آلودگی هوا با دقت بالا در ۵۲ شهر کشور ژاپن و داده‌های هواشناسی استفاده شده است. مقایسه مدل پیشنهادی با داده‌های سازمان مطالعات محیط‌زیست

1 Adaptive Boosting (AdaBoost)

2 Extreme Gradient Boosting (XGBoost)

3 Least Absolute Shrinkage and Selection Operation (LASSO)

کشور ژاپن نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل پیشنهادی بوده است (Ong, Sugiura & Zettsu, 2016). در پژوهشی دیگر در کشور چین، پیش‌بینی میانگین غلظت آلاینده در تمام ایستگاه‌ها به طور همزمان برای چهار فصل آینده سال، توسط الگوریتم‌های ARMA^۱، LSTM^۲، LSTME^۳، STDL^۴، SVR و TDNN^۵ مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه با استفاده از داده‌های ۱۲ ایستگاه سنجش آلودگی هوا در شهر پکن، برای در نظر گرفتن ارتباطات ذاتی مکانی-زمانی، از ترکیب دو مدل خود رمزنگار عمیق و رگرسیون منطقی استفاده شد. در این روش، خروجی آخرین لایه پنهان خود رمزنگار به عنوان ورودی برای لایه رگرسیون منطقی استفاده شده است. مدل ارائه شده در این تحقیق، براساس درصد میانگین مطلق خطای (MAPE)^۶ معادل ۲۵ درصد، در مقایسه با سایر روش‌های شبکه عصبی مصنوعی ارائه شده، دقت بالاتری داشته است (Li et al., 2017).

هوچریتز و اسچمیدبر (Hochreiter & Schmidhuber, 1997)، برای اولین بار نوع خاصی از شبکه‌های بازگشتی تحت عنوان LSTM را ارائه کردند که یکی از روش‌های پُر کاربرد در زمینه پیش‌بینی آلودگی هوا به شمار می‌آید (Greff, Srivastava, Koutník, Steunebrink & Schmidhuber, 2016). به عنوان مثال در کشور چین، Reddy و همکاران (Reddy, Yedavalli, Mohanty & Nakhat, 2018)، با استفاده از روش حافظه طولانی کوتاه مدت (LSTM) در بازه سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷، به پیش‌بینی غلظت PM_{2.5} پرداختند. در مطالعه‌ای دیگر، کریمیان و همکاران (Karimian et al., 2019)، با استفاده از داده‌های نه ایستگاه سنجش آلودگی هوا در شهر تهران در بازه سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۷ با استفاده از سه روش به پیش‌بینی غلظت PM_{2.5} پرداختند که روش LSTM بهترین نتایج را به دست داد.

چانگ و همکاران (Chung, Gulcehre, Cho & Bengio, 2014)، شبکه بازگشتی GRU^۴ را ارائه کردند که مدل ساده‌سازی شده شبکه LSTM محسوب می‌شود. در مطالعه‌ای که آسیرا و همکاران (Athira, Geetha, 2018) در کشور چین انجام دادند، از سه الگوی یادگیری عمیق شامل شبکه عصبی بازگشتی، شبکه LSTM و شبکه GRU جهت پیش‌بینی غلظت PM_{2.5} از داده‌های ۱۴۹۸ سنجنده آلودگی استفاده شد. نتایج حاصله عملکرد بهتر شبکه GRU را اثبات می‌کند.

در پژوهشی که ژو و همکاران (Xu et al., 2018) در استان بریتیش کلمبیا در غرب کانادا انجام دادند، جهت برآورد غلظت ذرات PM_{2.5} از روش‌های یادگیری ماشین استفاده گردید. براساس نتایج این مطالعه، روش‌های XGBoost، Cubist و جنگل تصادفی، عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشتند. در مطالعه‌ای دیگر، لیو و همکاران (Liu, Weng, Li & Cribb, 2019)، در برآورد غلظت PM_{2.5} با استفاده از روش جنگل تصادفی (RF)، به مقدار ۰/۸۶ برای R² رسیدند. آهنی و همکاران (Ahani, Salari & Shadman, 2019) در برآورد غلظت PM_{2.5} هوای آزاد شهر مشهد، از دو روش یادگیری ماشین شبکه عصبی چندلایه (MLP)^۵ و میانگین متحرک

1 Auto Regression Moving Average (ARMA)

2 Long Short-Term Memory (LSTM)

3 Long Short-Term Memory Extended (LSTME)

4 SpatioTemporal Deep Learning (STDL)

5 Time Delay Neural Network (TDNN)

6 Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

خود همبسته یکپارچه (ARIMA)، استفاده نمودند. پارامترهای هواشناسی و کیفیت هوا بعنوان ورودی کمکی مدل‌ها استفاده شده و نتایج نشان داد که روش ARIMA بهترین عملکرد را در برآورد غلظت $PM_{2.5}$ داشت. زمانی و همکاران (Zamani Joharestani, Cao, Ni, Bashir & Talebiesfandarani, 2019) برای پیش‌بینی غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ در شهر تهران، از سه روش یادگیری ماشین یعنی جنگل تصادفی، XGBoost و یادگیری عمیق استفاده کردند. در مقایسه با روش‌های جنگل تصادفی و یادگیری عمیق، روش XGBoost با داشتن مقدار R^2 برابر با ۰/۸۱ و $RMSE^1$ برابر با $13/85 \mu g m^{-3}$ ، عملکرد بهتری را از خود نشان داد. پنگ و همکاران (Peng et al., 2022)، در استان هونان چین در مجموع ۱۷۵۲۰ داده را با بهره‌گیری از دو الگوریتم یادگیری ماشین (تقویت گرادیان XGBoost و یادگیری عمیق)، شش پارامتر هواشناسی (فشار اتمسفر، رطوبت نسبی، سرعت باد، جهت باد، بارندگی و دما) و غلظت $PM_{2.5}$ که به طور مستقل از دو سایت پایش در طول سال ۲۰۲۱ اندازه‌گیری شده بود، مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از عملکرد بهتر شبکه XGBoost بوده است. در پژوهش انجام‌شده توسط انبیش و همکاران (Enebish, Chau, Jadamba & Franklin, 2021) در شهر اولان باتور در کشور مغولستان، محققان در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۸ از شش الگوریتم یادگیری ماشین استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که الگوریتم‌های جنگل تصادفی و XGBoost عملکرد بهتری در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها داشتند. در مطالعه شکرخدایی و همکاران (Shogrkhodaei, Razavi-Termeh & Fathnia, 2021) در شهر تهران، برای برآورد غلظت $PM_{2.5}$ از سه روش یادگیری ماشین استفاده شده است: AdaBoost، جنگل تصادفی و گرادیان کاهشی تصادفی (SGD)^۲. نتایج این پژوهش نشان داد که در میان این سه روش، روش جنگل تصادفی عملکرد بهتری داشته است. در مطالعه‌ای دیگر، آیوس و همکاران (Ayus, Natarajan & Gupta, 2023)، در بازه زمانی هفت ساله از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۱ برای ده شهر بزرگ در سراسر چین با استفاده از شش تکنیک مختلف یادگیری عمیق شامل شبکه عصبی مکرر (RNN)^۳، واحد برگشتی دروازه‌ای دو جهته (Bi-GRU)^۴، حافظه طولانی کوتاه مدت دو جهته (BiLSTM)^۵، شبکه عصبی کانولوشنالی حافظه طولانی کوتاه مدت دو جهته (CNN-BiLSTM)^۶، شبکه کانولوشنالی حافظه طولانی کوتاه مدت دو جهته (Conv1D-BiLSTM)^۷ و مدل تقویت گرادیان (XGBoost)، استفاده کردند. نتایج نشان داد Conv1D-BiLSTM و CNN-BiLSTM در بین مدل‌های یادگیری عمیق در برآورد شاخص کیفیت هوا (AQI)^۸، عملکرد خوبی دارند؛ در حالی که مدل یادگیری ماشین (XGBoost)، بهتر از مدل‌های یادگیری عمیق است. لی و همکاران (Li, Huo & Liu, 2022)

1 Root Mean Squared Error (RMSE)

2 Stochastic Gradient Descent (SGD)

3 Recurrent Neural Network (RNN)

4 Bidirectional Gated Recurrent Unit (Bi-GRU)

5 Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM)

6 Convolutional Neural Network BiLSTM (CNN-BiLSTM)

7 Convolutional BiLSTM (Conv1D-BiLSTM)

8 Air Quality Index (AQI)

در شهر شینبی کشور تایوان با استفاده روش پیش‌بینی ترکیبی LSTM-XGBoost-SVR بر اساس ویژگی‌های زمانی-مکانی، توانستند دقت پیش‌بینی را بهبود بخشند.

محمدی و همکاران (Mohammadi, Teiri, Hajizadeh, Abdolahnejad & Ebrahimi, 2024)، از داده‌های هواشناسی نه سال گذشته در شهر اصفهان، برای پیش‌بینی غلظت $PM_{2.5}$ با استفاده از چهار الگوریتم یادگیری ماشین شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، K-همسایگان نزدیک (KNN)^۱، ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM)^۲ و جنگل تصادفی (RF)، استفاده کردند. نتایج نشان داد که بر اساس درصد دقت، مدل ANN و RF در مقایسه با سایر مدل‌ها برای پیش‌بینی غلظت $PM_{2.5}$ عملکرد بهتری داشت.

در مطالعه‌ای دیگر یانگ و همکاران (Yang et al., 2024) برای برآورد غلظت $PM_{2.5}$ یک مدل شبکه عصبی حافظه بلندمدت و کوتاه‌مدت (LSTM) و رگرسیون جنگل تصادفی (RF)، استفاده کردند. در نهایت، با توجه به شاخص‌های ارزیابی مدل، مدل رگرسیون جنگل تصادفی ($RMSE = 4.59 \mu g m^{-3}$, $R^2 = 0.93$)، به عنوان مدل بهینه انتخاب شد. رن و همکاران (Ren, Zhang & Fan, 2024)، جهت برآورد غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ از الگوریتم‌های جنگل تصادفی، XGBoost، MLR و مدل تلفیقی^۳ این الگوریتم‌ها استفاده کردند. نتایج نشان دهنده دقت بالای برآورد مدل تلفیقی نسبت به سایر مدل‌ها بود. در مطالعه‌ای دیگر چن و همکاران (Chen et al., 2024)، برای برآورد غلظت $PM_{2.5}$ از مدل تلفیقی توسعه یافته استفاده کردند؛ این الگوریتم براساس برآورد انباشتگی با ساختار دو لایه و تلفیق چندین مدل یادگیری ماشین، ساخته شده است. مدل تلفیقی توسعه یافته در این مطالعه در مقایسه با سایر مدل‌های مستقل (جنگل تصادفی، LightGBM^۴ و XGBoost) دقت بالاتری را نشان می‌دهد ($R^2 = 0.87$).

در پژوهش انجام شده توسط آگیلرا و همکاران (Aguilera et al., 2023)، سه الگوریتم یادگیری ماشین (یعنی یادگیری عمیق، جنگل تصادفی (RF) و گرادیان تقویتی) در برآورد غلظت $PM_{2.5}$ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که تلفیق بهینه این سه الگوریتم، بهترین عملکرد را با ضریب همبستگی $R^2 = 0.78$ به دست خواهد داد. این یافته نشان می‌دهد که استفاده از یک ترکیب چند الگوریتمی (در مقایسه با استفاده از هر الگوریتم به تنهایی) می‌تواند به طور مؤثرتری غلظت $PM_{2.5}$ را برآورد نماید. رویکرد ترکیبی فوق مزایایی همچون بهبود دقت، پوشش وسیع‌تر ویژگی‌ها و مقاومت در برابر نقاط ضعف هر الگوریتم را به همراه خواهد داشت.

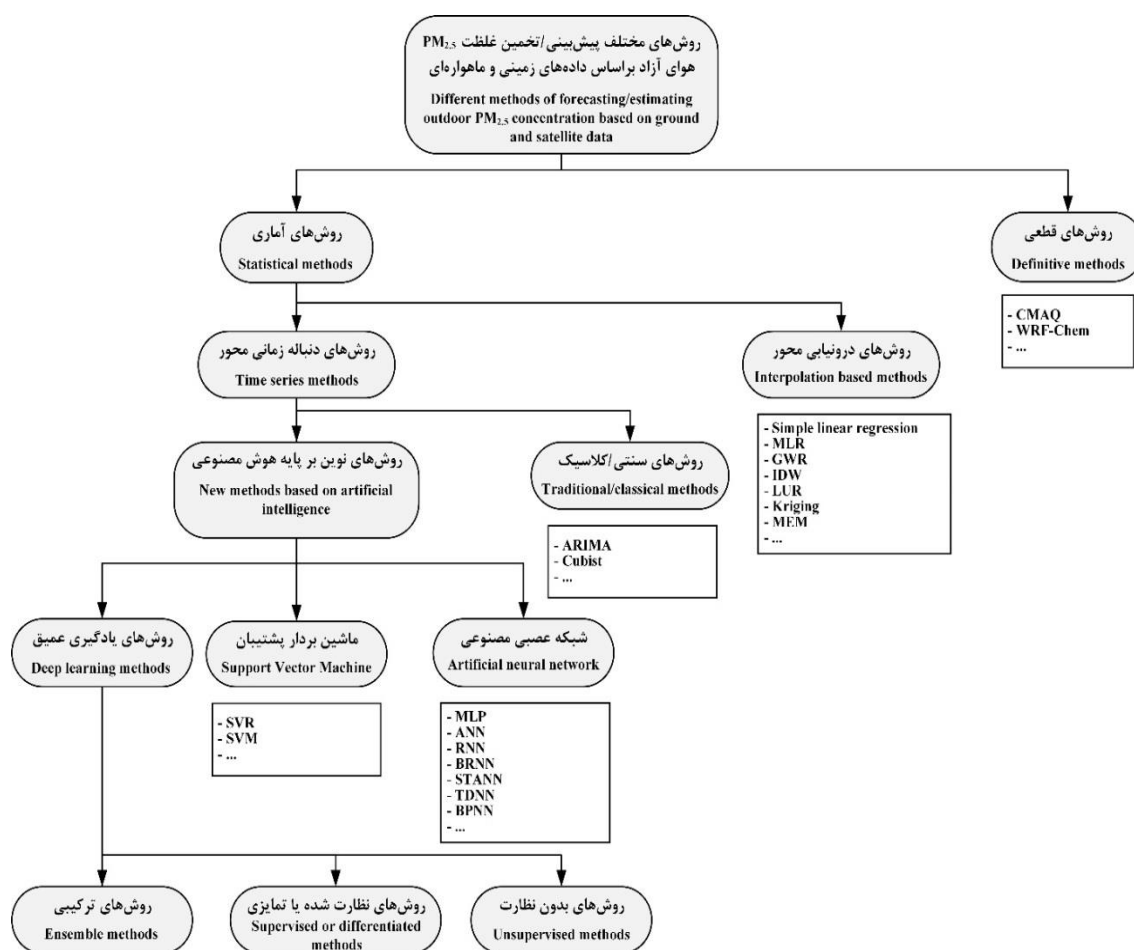
همانطور که در متن اشاره گردید، الگوریتم‌های یادگیری ماشین بخش نوینی از روش‌های آماری مبتنی بر دنباله زمانی بوده (شکل ۶) و روند استفاده از آنها در برآورد غلظت $PM_{2.5}$ زمینی براساس AOD، افزایشی است.

1 K-Nearest-Neighbors (KNN)

2 Support Vector Machine (SVM)

3 Ensemble Model

4 Light Gradient Boosting Model (LightGBM)



شکل ۶- روش‌های مختلف پیش‌بینی / برآورد غلظت $PM_{2.5}$ براساس داده‌های زمینی و ماهواره‌ای

Fig.6. Various Methods for Predicting/Estimating $PM_{2.5}$ Concentrations Based on Ground and Satellite Data

نتیجه‌گیری

در برآورد غلظت $PM_{2.5}$ زمینی، شاخص AOD معیار مناسبی ارائه می‌دهد. مطالعات بیانگر آن است که استفاده از داده‌های کمکی نظیر شرایط اتمسفری (رطوبت نسبی هوا، دمای سطحی، فاصله دید افقی و سرعت و جهت باد)، بر تقویت همبستگی $PM_{2.5}$ و AOD تأثیرگذار خواهد بود. با این وجود، افزایش تعداد پارامترهای مورد استفاده، منجر به پیچیدگی روابط و افزایش خطای الگوریتم‌های یادگیری ماشین خواهد شد. استفاده از الگوریتم‌های تلفیقی یادگیری در چنین حالاتی، به دلیل توانایی در انتخاب و مدیریت تعداد پارامترهای زیاد، توصیه شده است. مجموعه داده‌های بکار رفته در برقراری همبستگی قوی بین غلظت $PM_{2.5}$ زمینی و شاخص AOD توسط محققان عبارتند از:

(الف) داده‌های ماهواره‌ای: شامل عمق نوری آئروسول (AOD) که از سنسورهای MODIS و OMI استخراج

شده‌اند.

(ب) داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی: شامل متغیرهای دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، جهت باد و بارش.
(ج) داده‌های زمینی: شامل شاخص پوشش گیاهی (NDVI)^۱، تراکم جمعیت، تراکم شبکه جاده‌ای، ارتفاع و تعداد ساختمان‌ها.

(د) داده‌های آلودگی هوا: شامل غلظت PM_{2.5} و سایر آلاینده‌ها مانند CO، O₃، NO، NO₂ و SO₂.
مطابق با تحقیقات انجام گرفته، با توجه به حجم بالای داده‌ها و استفاده همزمان از چند پارامتر و همچنین به دلیل وجود رابطه غیرخطی بین PM_{2.5} و متغیرهای پیش‌بینی کننده، الگوریتم‌های یادگیری ماشین بواسطه توانایی برتر در انتخاب و مدیریت تعداد زیادی متغیر مستقل، که قادر به پیش‌بینی متغیر وابسته در مسائل تحلیل پیشرفته داده‌ها و حل کردن مسائل پیچیده هستند، در سالیان اخیر در کانون توجه محققان قرار گرفته اند.

در بین الگوریتم‌های یادگیری ماشین، مدل‌های ترکیبی به دلیل برآوردهای دقیقتر، انعطاف‌پذیر بودن، پردازش موازی و سرعت بالا، توجه به داده‌های گمشده و صرف زمان کمتر برای آموزش و برآورد، در برآورد غلظت PM_{2.5} زمینی عملکرد مناسبتری نسبت به عملکرد هریک از الگوریتم‌ها به تنهایی، داشته اند. الگوریتم‌های ترکیبی که چندین مدل (همچون RF، XGboost و CNN^۲) را ترکیب می‌کنند، سوگیری^۳ را کاهش داده، استحکام پیش‌بینی‌ها را افزایش می‌دهند و در بهبود دقت پیش‌بینی موثر هستند. با وجود پیشرفت‌های اخیر، هنوز چالش‌ها و محدودیت‌های ذاتی به دلیل عدم قطعیت در داده‌های ورودی و تغییرات جوی و هواشناسی، در این زمینه وجود داشته و اثربخشی مدل‌ها برای افق‌های پیش‌بینی طولانی‌تر (بیش از ۱۲ ساعت در برخی موارد)، کاهش می‌یابد.

از جمله این چالش‌ها که تحقیقات آتی باید به آن‌ها بپردازد می‌توان به عدم اطمینان در داده‌های ورودی، پیچیدگی‌های ناشی از تغییرات زمانی و مکانی و نیاز به ترکیب داده‌های چندمنبعی، اشاره کرد. برای رفع این چالش‌ها، تحقیقات آینده باید بر توسعه الگوریتم‌های ترکیبی پیشرفته‌تر متمرکز شوند که قابلیت مدیریت داده‌های گمشده، پردازش حجم بالای داده‌ها و تطبیق با تغییرات محیطی را داشته باشند. همچنین، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای با وضوح مکانی و زمانی بالاتر، بهبود کیفیت متغیرهای کمکی (مانند داده‌های هواشناسی) و تلفیق داده‌های ایستگاه‌های زمینی و سنجش از دور می‌تواند دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهد. علاوه بر این، طراحی مدل‌هایی که توانایی پیش‌بینی تأثیرات بلندمدت تغییرات آب‌وهوایی را داشته باشند، می‌تواند مسیر جدیدی برای پژوهش‌های آینده ایجاد کند.

1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

2 Convolutional Neural Network

3 Bias

References

- Abbas, A., Ekowati, D., Suhariadi, F., & Fenitra, R. M. (2023). Health implications, leaders societies, and climate change: a global review. *Ecological footprints of climate change: Adaptive approaches and sustainability*, 653-675. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15501-7_26
- Aguilera, R., Luo, N., Basu, R., Wu, J., Clemesha, R., Gershunov, A., & Benmarhnia, T. (2023). A novel ensemble-based statistical approach to estimate daily wildfire-specific PM_{2.5} in California (2006–2020). *Environment International*, 171, 107719. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107719>
- Ahani, I. K., Salari, M., & Shadman, A. (2019). Statistical models for multi-step-ahead forecasting of fine particulate matter in urban areas. *Atmospheric Pollution Research*, 10(3), 689-700. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.11.006>
- Athira, V., Geetha, P., Vinayakumar, R., & Soman, K. P. (2018). DeepAirNet: Applying recurrent networks for air quality prediction. *Procedia Computer Science*, 132, 1394-1403. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.05.068>
- Ayus, I., Natarajan, N., & Gupta, D. (2023). Comparison of machine learning and deep learning techniques for the prediction of air pollution: a case study from China. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 17(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s44273-023-00005-w>
- Bai, L., Wang, J., Ma, X., & Lu, H. (2018). Air pollution forecasts: An overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(4), 780. <https://doi.org/10.3390/ijerph15040780>
- Beckerman, B. S., Jerrett, M., Serre, M., Martin, R. V., Lee, S. J., Van Donkelaar, A., ... & Burnett, R. T. (2013). A hybrid approach to estimating national scale spatiotemporal variability of PM_{2.5} in the contiguous United States. *Environmental Science & Technology*, 47(13), 7233-7241. <https://doi.org/10.1021/es400039u>
- Bell, M. L., Dominici, F., Ebisu, K., Zeger, S. L., & Samet, J. M. (2007). Spatial and temporal variation in PM_{2.5} chemical composition in the United States for health effects studies. *Environmental Health Perspectives*, 115(7), 989-995. <https://doi.org/10.1289/ehp.962>
- Bono, R., Tassinari, R., Bellisario, V., Gilli, G., Pazzi, M., Pirro, V., ... & Piccioni, P. (2015). Urban air and tobacco smoke as conditions that increase the risk of oxidative stress and respiratory response in youth. *Environmental Research*, 137, 141-146. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.12.008>
- Chen, B., You, S., Ye, Y., Fu, Y., Ye, Z., Deng, J., ... & Hong, Y. (2021). An interpretable self-adaptive deep neural network for estimating daily spatially-continuous PM_{2.5} concentrations across China. *Science of The Total Environment*, 768, 144724. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144724>
- Chen, L., Wu, Z., Tu, W., & Cao, Z. (2020). Applying LUR model to estimate spatial variation of PM_{2.5} in the Greater Bay Area, China. In *Spatiotemporal Analysis of Air Pollution and Its Application in Public Health*, 207-215. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815822-7.00010-8>

- Chen, X., Zhang, W., He, J., Zhang, L., Guo, H., Li, J., & Gu, X. (2024). Mapping PM_{2.5} concentration from the top-of-atmosphere reflectance of Himawari-8 via an ensemble stacking model. *Atmospheric Environment*, 120560. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120560>
- Chudnovsky, A., Tang, C., Lyapustin, A., Wang, Y., Schwartz, J., & Koutrakis, P. J. A. C. (2013). A critical assessment of high-resolution aerosol optical depth retrievals for fine particulate matter predictions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(21), 10907-10917. <https://doi.org/10.5194/acp-13-10907-2013>
- Chung, J., Gulcehre, C., Cho, K., & Bengio, Y. (2014). Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling. *arXiv preprint arXiv:1412.3555*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.3555>
- Cortina-Januchs, M. G., Quintanilla-Dominguez, J., Vega-Corona, A., & Andina, D. (2015). Development of a model for forecasting of PM₁₀ concentrations in Salamanca, Mexico. *Atmospheric Pollution Research*, 6(4), 626-634. <https://doi.org/10.5094/APR.2015.071>
- Das Chagas Moura, M., Zio, E., Lins, I. D., & Drogue, E. (2011). Failure and reliability prediction by support vector machines regression of time series data. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(11), 1527-1534. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.06.006>
- De Hoogh, K., Gulliver, J., van Donkelaar, A., Martin, R. V., Marshall, J. D., Bechle, M. J., ... & Hoek, G. (2016). Development of West-European PM_{2.5} and NO₂ land use regression models incorporating satellite-derived and chemical transport modelling data. *Environmental Research*, 151, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.07.005>
- Deng, L., & Yu, D. (2014). Deep learning: methods and applications. *Foundations and Trends® in signal processing*, 7(3-4), 197-387. <http://dx.doi.org/10.1561/20000000039>
- Enebish, T., Chau, K., Jadamba, B., & Franklin, M. (2021). Predicting ambient PM_{2.5} concentrations in Ulaanbaatar, Mongolia with machine learning approaches. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 31(4), 699-708. <https://doi.org/10.1038/s41370-020-0257-8>
- Feng, L., Li, Y., Wang, Y., & Du, Q. (2020). Estimating hourly and continuous ground-level PM_{2.5} concentrations using an ensemble learning algorithm: The ST-stacking model. *Atmospheric Environment*, 223, 117242. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117242>
- Fotheringham, A. S., Charlton, M. E., & Brunsdon, C. (1998). Geographically weighted regression: a natural evolution of the expansion method for spatial data analysis. *Environment and planning A*, 30(11), 1905-1927. <https://doi.org/10.1068/a301905>
- Geng, G., Zhang, Q., Martin, R. V., Van Donkelaar, A., Hong, H., Che, H., ... & He, K. (2015). Estimating long-term PM_{2.5} concentrations in China using satellite-based aerosol optical depth and a chemical transport model. *Remote Sensing of Environment*, 166, 262-270. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.016>
- Ghaemi, Z., Farnaghi, M., & Alimohammadi, A. (2016). An Online Approach for Spatio-Temporal Prediction of Air Pollution in Tehran using Support Vector Machine. *Engineering Journal of Geospatial Information Technology*, 3(4), 43-63.[In Persian] <http://jgit.kntu.ac.ir/article-1-305-en.html>

- Greff, K., Srivastava, R. K., Koutník, J., Steunebrink, B. R., & Schmidhuber, J. (2016). LSTM: A search space odyssey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 28(10), 2222-2232. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2582924>
- Gulliver, J., Morley, D., Dunster, C., McCrea, A., van Nunen, E., Tsai, M. Y., ... & Kelly, F. J. (2018). Land use regression models for the oxidative potential of fine particles (PM_{2.5}) in five European areas. *Environmental Research*, 160, 247-255. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.10.002>
- Guo, Y., Tang, Q., Gong, D. Y., & Zhang, Z. (2017). Estimating ground-level PM_{2.5} concentrations in Beijing using a satellite-based geographically and temporally weighted regression model. *Remote Sensing of Environment*, 198, 140-149. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.001>
- Han, W., & Tong, L. (2019). Satellite-based estimation of daily ground-level PM_{2.5} concentrations over urban agglomeration of Chengdu Plain. *Atmosphere*, 10(5), 245. <https://doi.org/10.3390/atmos10050245>
- Han, Z., Zhao, J., Leung, H., Ma, K. F., & Wang, W. (2019). A review of deep learning models for time series prediction. *IEEE Sensors Journal*, 21(6), 7833-7848. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2923982>
- He, Q., & Huang, B. (2018). Satellite-based high-resolution PM_{2.5} estimation over the Beijing-Tianjin-Hebei region of China using an improved geographically and temporally weighted regression model. *Environmental Pollution*, 236, 1027-1037. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.053>
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
- Hosseini, V., & Shahbazi, H. (2016). Urban air pollution in Iran. *Iranian Studies*, 49(6), 1029-1046. <https://doi.org/10.1080/00210862.2016.1241587>
- Hsu, N. C., Tsay, S. C., King, M. D., & Herman, J. R. (2004). Aerosol properties over bright-reflecting source regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(3), 557-569. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2004.824067>
- Hu, X., Waller, L. A., Al-Hamdan, M. Z., Crosson, W. L., Estes Jr, M. G., Estes, S. M., ... & Liu, Y. (2013). Estimating ground-level PM_{2.5} concentrations in the southeastern U.S. using geographically weighted regression. *Environmental Research*, 121, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2012.11.003>
- Hu, Z., Liebens, J., & Rao, K. R. (2011). Merging satellite measurement with ground-based air quality monitoring data to assess health effects of fine particulate matter pollution. In *Geospatial Analysis of Environmental Health* (pp. 395-409). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0329-2_20
- Huang, K., Bi, J., Meng, X., Geng, G., Lyapustin, A., Lane, K. J., ... & Liu, Y. (2019). Estimating daily PM_{2.5} concentrations in New York City at the neighborhood-scale: Implications for integrating non-regulatory measurements. *Science of the Total Environment*, 697, 134094. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134094>
- Institute for Environmental Research, Tehran University of Medical Sciences and National Institute of Health Research, (I.R. Iran). (2019). Air quality in Iran and its effects on health

- in 2017. Available at (accessed: May 2024): <https://enier.tums.ac.ir/Center-for-Air-Pollution-Research-News/Air-quality-in-Iran-its-effects-on-health-in-2017>
- Izah, S. C., Iyiola, A. O., Yarkwan, B., & Richard, G. (2023). Impact of air quality as a component of climate change on biodiversity-based ecosystem services. In *Visualization techniques for climate change with machine learning and artificial intelligence*, 123-148. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99714-0.00005-4>
- Jia, N., Li, Y., Chen, R., & Yang, H. (2023). A review of global PM_{2.5} exposure research trends from 1992 to 2022. *Sustainability*, 15(13), 10509. <https://doi.org/10.3390/su151310509>
- Jiang, T., Chen, B., Nie, Z., Ren, Z., Xu, B., & Tang, S. (2021). Estimation of hourly full-coverage PM_{2.5} concentrations at 1-km resolution in China using a two-stage random forest model. *Atmospheric Research*, 248, 105146. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105146>
- Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, 151(2), 362-367. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
- Karimian, H., Li, Q., Wu, C., Qi, Y., Mo, Y., Chen, G., ... & Sachdeva, S. (2019). Evaluation of different machine learning approaches to forecasting PM_{2.5} mass concentrations. *Aerosol and Air Quality Research*, 19(6), 1400-1410. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.12.0450>
- Kaufman, Y. J., Wald, A. E., Remer, L. A., Gao, B. C., Li, R. R., & Flynn, L. (1997). The MODIS 2.1- μ m channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(5), 1286-1298. <https://doi.org/10.1109/36.628795>
- Kelly, F. J., & Fussell, J. C. (2012). Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter. *Atmospheric Environment*, 60, 504-526. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.039>
- Koelemeijer, R. B. A., Homan, C. D., & Matthijsen, J. (2006). Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe. *Atmospheric Environment*, 40(27), 5304-5315. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.04.044>
- Kong, L., Xin, J., Zhang, W., & Wang, Y. (2016). The empirical correlations between PM_{2.5}, PM₁₀ and AOD in the Beijing metropolitan region and the PM_{2.5}, PM₁₀ distributions retrieved by MODIS. *Environmental Pollution*, 216, 350-360. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.085>
- Kuremoto, T., Kimura, S., Kobayashi, K., & Obayashi, M. (2014). Time series forecasting using a deep belief network with restricted Boltzmann machines. *Neurocomputing*, 137, 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2013.03.047>
- Lachtermacher, G., & Fuller, J. D. (1995). Back propagation in time-series forecasting. *Journal of Forecasting*, 14(4), 381-393. <https://doi.org/10.1002/for.3980140405>
- Lai, X., Li, H., & Pan, Y. (2021). A combined model based on feature selection and support vector machine for PM_{2.5} prediction. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40(5), 10099-10113. <https://doi.org/10.3233/JIFS-202812>
- Lee, H. J., Coull, B. A., Bell, M. L., & Koutrakis, P. (2012). Use of satellite-based aerosol optical depth and spatial clustering to predict ambient PM_{2.5} concentrations. *Environmental Research*, 118, 8-15. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2012.06.011>

- Lee, H. J., Liu, Y., Coull, B. A., Schwartz, J., & Koutrakis, P. (2011). A novel calibration approach of MODIS AOD data to predict PM_{2.5} concentrations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(15), 7991-8002. <https://doi.org/10.5194/acp-11-7991-2011>
- Lee, J. H., Wu, C. F., Hoek, G., de Hoogh, K., Beelen, R., Brunekreef, B., & Chan, C. C. (2015). LUR models for particulate matters in the Taipei metropolis with high densities of roads and strong activities of industry, commerce and construction. *Science of the Total Environment*, 514, 178-184. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.091>
- Li, H., Yu, Y., Huang, Z., Sun, S., & Jia, X. (2023). A multi-step ahead point-interval forecasting system for hourly PM_{2.5} concentrations based on multivariate decomposition and kernel density estimation. *Expert Systems with Applications*, 226, 120140. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120140>
- Li, L., Zhang, J., Meng, X., Fang, Y., Ge, Y., Wang, J., ... & Kan, H. (2018a). Estimation of PM_{2.5} concentrations at a high spatiotemporal resolution using constrained mixed-effect bagging models with MAIAC aerosol optical depth. *Remote Sensing of Environment*, 217, 573-586. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.001>
- Li, R., Ma, T., Xu, Q., & Song, X. (2018b). Using MAIAC AOD to verify the PM_{2.5} spatial patterns of a land use regression model. *Environmental Pollution*, 243, 501-509. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.026>
- Li, X., Huo, H., & Liu, Z. (2022). Analysis and prediction of PM_{2.5} concentration based on LSTM-XGBoost-SVR model. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2158285/v1>
- Li, X., Peng, L., Hu, Y., Shao, J., & Chi, T. (2016). Deep learning architecture for air quality predictions. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 22408-22417. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7812-9>
- Li, X., Peng, L., Yao, X., Cui, S., Hu, Y., You, C., & Chi, T. (2017). Long short-term memory neural network for air pollutant concentration predictions: Method development and evaluation. *Environmental Pollution*, 231, 997-1004. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.114>
- Liu, J., Weng, F., Li, Z., & Cribb, M. C. (2019). Hourly PM_{2.5} estimates from a geostationary satellite based on an ensemble learning algorithm and their spatiotemporal patterns over central east China. *Remote Sensing*, 11(18), 2120. <https://doi.org/10.3390/rs11182120>
- Liu, Y., Franklin, M., Kahn, R., & Koutrakis, P. (2007). Using aerosol optical thickness to predict ground-level PM_{2.5} concentrations in the St. Louis area: A comparison between MISR and MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 107(1-2), 33-44. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.05.022>
- Liu, Y., Paciorek, C. J., & Koutrakis, P. (2009). Estimating regional spatial and temporal variability of PM_{2.5} concentrations using satellite data, meteorology, and land use information. *Environmental Health Perspectives*, 117(6), 886-892. <https://doi.org/10.1289/ehp.0800123>
- Liu, Y., Sarnat, J. A., Kilaru, V., Jacob, D. J., & Koutrakis, P. (2005). Estimating ground-level PM_{2.5} in the eastern United States using satellite remote sensing. *Environmental Science & Technology*, 39(9), 3269-3278. <https://doi.org/10.1021/es049352m>

- Lu, J. G. (2020). Air pollution: A systematic review of its psychological, economic, and social effects. *Current Opinion in Psychology*, 32, 52-65. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2019.06.024>
- Lu, J., Li, B., Li, H., & Al-Barakani, A. (2021). Expansion of city scale, traffic modes, traffic congestion, and air pollution. *Cities*, 108, 102974. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102974>
- Lu, Y., Duan, Y., Kang, W., Li, Z., & Wang, F. Y. (2014). Traffic flow prediction with big data: A deep learning approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(2), 865-873. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2345663>
- Mao, L., Qiu, Y., Kusano, C., & Xu, X. (2012). Predicting regional space-time variation of PM_{2.5} with land-use regression model and MODIS data. *Environmental Science and Pollution Research*, 19, 128-138. <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0546-9>
- Masroor, K., Fanaei, F., Yousefi, S., Raeesi, M., Abbaslou, H., Shahsavani, A., & Hadei, M. (2020). Spatial modelling of PM_{2.5} concentrations in Tehran using Kriging and inverse distance weighting (IDW) methods. *Journal of Air Pollution and Health*, 5(2), 89-96. <https://doi.org/10.18502/japh.v5i2.4237>
- Mellit, A., & Pavan, A. M. (2010). A 24-h forecast of solar irradiance using artificial neural network: Application for performance prediction of a grid-connected PV plant at Trieste, Italy. *Solar Energy*, 84(5), 807-821. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.02.006>
- Meng, X., Fu, Q., Ma, Z., Chen, L., Zou, B., Zhang, Y., ... & Liu, Y. (2016). Estimating ground-level PM₁₀ in a Chinese city by combining satellite data, meteorological information and a land use regression model. *Environmental Pollution*, 208, 177-184. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.09.042>
- Meyer, H., Kühnlein, M., Appelhans, T., & Nauss, T. (2016). Comparison of four machine learning algorithms for their applicability in satellite-based optical rainfall retrievals. *Atmospheric Research*, 169, 424-433. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.09.021>
- Miri, M., Ghassoun, Y., Dovlatabadi, A., Ebrahimnejad, A., & Löwner, M. O. (2019). Estimate annual and seasonal PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations using land use regression model. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174, 137-145. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.070>
- Mishra, D., & Goyal, P. (2015). Development of artificial intelligence based NO₂ forecasting models at Taj Mahal, Agra. *Atmospheric Pollution Research*, 6(1), 99-106. <https://doi.org/10.5094/APR.2015.012>
- Mohammadi, F., Teiri, H., Hajizadeh, Y., Abdollahnejad, A., & Ebrahimi, A. (2024). Prediction of atmospheric PM_{2.5} level by machine learning techniques in Isfahan, Iran. *Scientific Reports*, 14(1), 2109. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52617-z>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & PRISMA Group, T. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *Annals of Internal Medicine*, 151(4), 264-269. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-151-4-200908180-00135>

- Moore, D. K., Jerrett, M., Mack, W. J., & Künzli, N. (2007). A land use regression model for predicting ambient fine particulate matter across Los Angeles, CA. *Journal of Environmental Monitoring*, 9(3), 246-252. <https://doi.org/10.1039/B615795E>
- Moryani, H. T., Kong, S., Du, J., & Bao, J. (2020). Health risk assessment of heavy metals accumulated on PM_{2.5} fractioned road dust from two cities of Pakistan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(19), 7124. <https://doi.org/10.3390/ijerph17197124>
- Nabavi, S. O., Haimberger, L., & Abbasi, E. (2019). Assessing PM_{2.5} concentrations in Tehran, Iran, from space using MAIAC, deep blue, and dark target AOD and machine learning algorithms. *Atmospheric Pollution Research*, 10(3), 889-903. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.12.017>
- Obodoeze, F. C., Nwabueze, C. A., & Akaneme, S. A. (2021). Comparative Evaluation of Machine Learning Regression Algorithms for PM_{2.5} Monitoring. *American Journal of Engineering Research*, 10(12), 19-33.
- Ong, B. T., Sugiura, K., & Zettsu, K. (2016). Dynamically pre-trained deep recurrent neural networks using environmental monitoring data for predicting PM_{2.5}. *Neural Computing and Applications*, 27, 1553-1566. <https://doi.org/10.1007/s00521-015-1955-3>
- Osimobi, O. J., Yorkor, B., & Nwankwo, C. A. (2019). Evaluation of daily pollutant standard index and air quality index in a university campus in Nigeria using PM₁₀ and PM_{2.5} particulate matter. *Journal of Science, Technology and Environment Informatics*, 7(2), 517-532. <https://doi.org/10.18801/jstei.070219.54>
- Paciorek, C. J., Liu, Y., Moreno-Macias, H., & Kondragunta, S. (2008). Spatiotemporal associations between GOES aerosol optical depth retrievals and ground-level PM_{2.5}. *Environmental science & technology*, 42(15), 5800-5806. <https://doi.org/10.1021/es703181j>
- Peng, L., Wang, L., Xia, D., & Gao, Q. (2022). Effective energy consumption forecasting using empirical wavelet transform and long short-term memory. *Energy*, 238, 121756. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121756>
- Perrone, M. G., Gualtieri, M., Consonni, V., Ferrero, L., Sangiorgi, G., Longhin, E., ... & Camatini, M. (2013). Particle size, chemical composition, seasons of the year and urban, rural or remote site origins as determinants of biological effects of particulate matter on pulmonary cells. *Environmental Pollution*, 176, 215-227. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.01.012>
- Pope III, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- Qi, Y., Li, Q., Karimian, H., & Liu, D. (2019). A hybrid model for spatiotemporal forecasting of PM_{2.5} based on graph convolutional neural network and long short-term memory. *Science of the Total Environment*, 664, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.333>
- Quan, T., Liu, X., & Liu, Q. (2010). Weighted least squares support vector machine local region method for nonlinear time series prediction. *Applied Soft Computing*, 10(2), 562-566. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.08.025>

- Reddy, V., Yedavalli, P., Mohanty, S., & Nakhat, U. (2018). Deep air: forecasting air pollution in Beijing, China. *Environmental Science*, 1564.
- Ren, Y., Zhang, Y., & Fan, S. (2024). PM_{2.5} Inversion Based on XGBoost And LightGBM Integrated Models. *Proceedings of the 4th International Conference on Environment Resources and Energy Engineering (ICEREE 2024)*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452002023>
- Ross, Z., Jerrett, M., Ito, K., Tempalski, B., & Thurston, G. D. (2007). A land use regression for predicting fine particulate matter concentrations in the New York City region. *Atmospheric Environment*, 41(11), 2255-2269. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.11.012>
- Saeed, S., Hussain, L., Awan, I. A., & Idris, A. (2017). Comparative analysis of different statistical methods for prediction of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in advance for several hours. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 17(11), 45-52. http://ijcsns.org/07_book/html/201711/201711006.html
- Sapankevych, N. I., & Sankar, R. (2009). Time series prediction using support vector machines: a survey. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 4(2), 24-38. <https://doi.org/10.1109/MCI.2009.932254>
- Sarker, I. H. (2021). Deep learning: a comprehensive overview on techniques, taxonomy, applications and research directions. *SN Computer Science*, 2(6), 420. <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00815-1>
- Schmidhuber, J. (2015). Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*, 61, 85-117. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.09.003>
- Shi, Y., Ho, H. C., Xu, Y., & Ng, E. (2018). Improving satellite aerosol optical depth-PM_{2.5} correlations using land use regression with microscale geographic predictors in a high-density urban context. *Atmospheric Environment*, 190, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.07.021>
- Shogrkhodaei, S. Z., Razavi-Termeh, S. V., & Fathnia, A. (2021). Spatio-temporal modeling of PM_{2.5} risk mapping using three machine learning algorithms. *Environmental Pollution*, 289, 117859. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117859>
- Song, Y., Qin, S., Qu, J., & Liu, F. (2015). The forecasting research of early warning systems for atmospheric pollutants: A case in Yangtze River Delta region. *Atmospheric Environment*, 118, 58-69. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.06.032>
- Stern, R., Builtjes, P. J. H., Schaap, M., Timmermans, R., Vautard, R., Hodzic, A., ... & Kerschbaumer, A. (2008). A model inter-comparison study focussing on episodes with elevated PM₁₀ concentrations. *Atmospheric Environment*, 42(19), 4567-4588. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.01.068>
- Su, J. G., Jerrett, M., Beckerman, B., Wilhelm, M., Ghosh, J. K., & Ritz, B. (2009). Predicting traffic-related air pollution in Los Angeles using a distance decay regression selection strategy. *Environmental Research*, 109(6), 657-670. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2009.06.001>
- Taheri Shahraiyni, H., & Sodoudi, S. (2016). Statistical modeling approaches for PM₁₀ prediction in urban areas; A review of 21st-century studies. *Atmosphere*, 7(2), 15. <https://doi.org/10.3390/atmos7020015>

- Tay, F. E., & Cao, L. (2001). Application of support vector machines in financial time series forecasting. *Omega*, 29(4), 309-317. [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(01\)00026-3](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(01)00026-3)
- U.S. EPA. (2024). Criteria air pollutants, the National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) Table. Available at (accessed: May 2024): <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
- Van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., Kahn, R., Levy, R., Verduzco, C., & Villeneuve, P. J. (2010). Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application. *Environmental Health Perspectives*, 118(6), 847-855. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901623>
- Vapnik, V. (2013). *The nature of statistical learning theory*. Springer science & business media. New York: Springer.
- Vicedo-Cabrera, A. M., Biggeri, A., Grisotto, L., Barbone, F., & Catelan, D. (2013). A Bayesian kriging model for estimating residential exposure to air pollution of children living in a high-risk area in Italy. *Geospatial Health*, 8(1), 87-95. <https://doi.org/10.4081/gh.2013.57>
- Wang, J., & Christopher, S. A. (2003). Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM_{2.5} mass: Implications for air quality studies. *Geophysical Research Letters*, 30(21). <https://doi.org/10.1029/2003GL018174>
- Wang, L., Zeng, Y., & Chen, T. (2015). Back propagation neural network with adaptive differential evolution algorithm for time series forecasting. *Expert Systems with Applications*, 42(2), 855-863. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.08.018>
- West, J. J., Cohen, A., Dentener, F., Brunekreef, B., Zhu, T., Armstrong, B., ... & Wiedinmyer, C. (2016). What we breathe impacts our health: improving understanding of the link between air pollution and health. *Environmental Science & Technology*, 50(10), 4895-4904. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03827>
- World Health Organization. (2016). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. *Clean Air J*, 26(2). <https://iris.who.int/handle/10665/250141>
- Wu, C. D., Chen, Y. C., Pan, W. C., Zeng, Y. T., Chen, M. J., Guo, Y. L., & Lung, S. C. C. (2017). Land-use regression with long-term satellite-based greenness index and culture-specific sources to model PM_{2.5} spatial-temporal variability. *Environmental Pollution*, 224, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.074>
- Xiao, Q., Wang, Y., Chang, H. H., Meng, X., Geng, G., Lyapustin, A., & Liu, Y. (2017). Full-coverage high-resolution daily PM_{2.5} estimation using MAIAC AOD in the Yangtze River Delta of China. *Remote Sensing of Environment*, 199, 437-446. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.023>
- Xu, Q., Chen, X., Yang, S., Tang, L., & Dong, J. (2021). Spatiotemporal relationship between Himawari-8 hourly columnar aerosol optical depth (AOD) and ground-level PM_{2.5} mass concentration in mainland China. *Science of the Total Environment*, 765, 144241. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144241>
- Xu, X., & Zhang, C. (2020). Estimation of ground-level PM_{2.5} concentration using MODIS AOD and corrected regression model over Beijing, China. *PLoS One*, 15(10), e0240430. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240430>

- Xu, Y., Ho, H. C., Wong, M. S., Deng, C., Shi, Y., Chan, T. C., & Knudby, A. (2018). Evaluation of machine learning techniques with multiple remote sensing datasets in estimating monthly concentrations of ground-level PM_{2.5}. *Environmental Pollution*, 242, 1417-1426. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.029>
- Xue, Q., Tian, Y., Liu, X., Wang, X., Huang, B., Zhu, H., & Feng, Y. (2022). Potential risks of PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals from inland and marine directions for a marine background site in North China. *Toxics*, 10(1), 32. <https://doi.org/10.3390/toxics10010032>
- Xue, W., Zhang, J., Zhong, C., Ji, D., & Huang, W. (2020). Satellite-derived spatiotemporal PM_{2.5} concentrations and variations from 2006 to 2017 in China. *Science of the Total Environment*, 712, 134577. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134577>
- Yamins, D. L., & DiCarlo, J. J. (2016). Using goal-driven deep learning models to understand sensory cortex. *Nature Neuroscience*, 19(3), 356-365. <https://doi.org/10.1038/nn.4244>
- Yan, X., Zang, Z., Luo, N., Jiang, Y., & Li, Z. (2020). New interpretable deep learning model to monitor real-time PM_{2.5} concentrations from satellite data. *Environment International*, 144, 106060. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106060>
- Yang, Q., Yuan, Q., Yue, L., Li, T., Shen, H., & Zhang, L. (2019). The relationships between PM_{2.5} and aerosol optical depth (AOD) in mainland China: About and behind the spatio-temporal variations. *Environmental Pollution*, 248, 526-535. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.071>
- Yang, Y., Wang, Z., Cao, C., Xu, M., Yang, X., Wang, K., ... & Shi, Z. (2024). Estimation of PM_{2.5} Concentration across China Based on Multi-Source Remote Sensing Data and Machine Learning Methods. *Remote Sensing*, 16(3), 467. <https://doi.org/10.3390/rs16030467>
- Yi, L., Mengfan, T., Kun, Y., Yu, Z., Xiaolu, Z., Miao, Z., & Yan, S. (2019). Research on PM_{2.5} estimation and prediction method and changing characteristics analysis under long temporal and large spatial scale-A case study in China typical regions. *Science of the Total Environment*, 696, 133983. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133983>
- Zamani Joharestani, M., Cao, C., Ni, X., Bashir, B., & Talebiesfandarani, S. (2019). PM_{2.5} prediction based on random forest, XGBoost, and deep learning using multisource remote sensing data. *Atmosphere*, 10(7), 373. <https://doi.org/10.3390/atmos10070373>
- Zhang, J., Zheng, Y., & Qi, D. (2017). Deep Spatio-Temporal Residual Networks for Citywide Crowd Flows Prediction. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 31(1). <https://doi.org/10.1609/aaai.v31i1.10735>
- Zhang, T., He, W., Zheng, H., Cui, Y., Song, H., & Fu, S. (2021). Satellite-based ground PM_{2.5} estimation using a gradient boosting decision tree. *Chemosphere*, 268, 128801. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128801>
- Zhang, X., Chu, Y., Wang, Y., & Zhang, K. (2018). Predicting daily PM_{2.5} concentrations in Texas using high-resolution satellite aerosol optical depth. *Science of the Total Environment*, 631, 904-911. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.255>

- Zhou, Y., Chang, F. J., Chang, L. C., Kao, I. F., Wang, Y. S., & Kang, C. C. (2019). Multi-output support vector machine for regional multi-step-ahead PM_{2.5} forecasting. *Science of the Total Environment*, 651, 230-240. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.111>
- Zou, B., Fang, X., Feng, H., & Zhou, X. (2021). Simplicity versus accuracy for estimation of the PM_{2.5} concentration: A comparison between LUR and GWR methods across time scales. *Journal of Spatial Science*, 66(2), 279-297. <https://doi.org/10.1080/14498596.2019.1624203>
- Zuo, X., Guo, H., Shi, S., & Zhang, X. (2020). Comparison of six machine learning methods for estimating PM_{2.5} concentration using the Himawari-8 aerosol optical depth. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(9), 1277-1287. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01154-z>



Investigation of storm variability using the Gordji method (case study: Mazandaran province)

Saina Vakili Azar^a, Yagob Dinpashoh^{b*}, Saeed Jahanbakhsh Asl^c

^a PhD candidate in water resources engineering, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

^b Professor of Water Engineering, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

^c Professor of Climatology, Department of Geography, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Article Info

Article history

Received : 7 September 2024

Received in revised form:

5 December 2024

Accepted:

29 December 2024

Available online:

21 March 2025

Keywords:

Huff curve,
Hyetograph,
Rainfall storm patterns,
Temporal rainfall
variability,
Mazandaran province,
Quartile analysis,
Design storms,
Iran hydrology

Abstract

The study of different rainfall patterns in different stations is crucial from the perspective of the hydrological process. In the present study, by using the 564 storms recorded in three rain gauge stations**, namely** Sari, Abbas Abad, and Firuzjah, the Huff curves were plotted in three rainfall classes**: i)** less than 6 hrs, ii) 6-12 hrs, and iii) more than 12 hrs. According to the 50% Huff curves, the storms were analyzed using the quartile approach. Then, the design storm hyetographs were plotted for the selected stations in different rainfall classes. Next, to investigate the variability of the storms, a new method was used based on the vertical distances obtained between the Huff curves of 80% and 20% (V), and also the values of 50% Huff curve (d_{50}) in three different percentages of time (25%, 50%, and 75%).

Results showed that the types of most storms in different rainfall classes were in the second quartile. Also, the results indicated that in most of the classes, a significant percentage of precipitation (more than 80%) falls by the seventh decile of the duration. By moving towards the last deciles, the percentage of rainfall decreased. According to the results, it was found that the highest variability of storms in the rainfall classes of less than 6 hrs, 6-12 hrs, and more than 12 hours was related to stations Sari, Abbas Abad, and Firuzjah, respectively. It seems that the results of this study will be helpful in the scientific management of water resources and timely warning of floods in the region

*.Corresponding author : Dr.Yagob Dinpashoh

E-mail address: dinpashoh@yahoo.com

How to cite this article: Vakili Azar, S., Dinpashoh, Y., & Jahanbakhsh Asl, S. (2025). Investigation of Storm Variability Using the Innovation Approach (Case Study: Mazandaran Province). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), pp. 187-209, DOI:https://doi.org/10.22067/geoeh.2024.89692.1518



Extended Abstract

Introduction:

A deep understanding of storm patterns in any region is useful in water resources management. Many researchers have studied rainfall storm patterns in different parts of the world. The pioneer researcher in this regard is the American researcher Huff (1967). He studied storm patterns using data from 261 recorded storms in the eastern USA. Pilgrim & Cordery (1975) derived hyetographs for storms using data from 50 storms in Australia. Spatiotemporal patterns of rainfall were analyzed in Canada by Loukas & Quick (1994). In Calabria, located in southern Italy, rainfall patterns were investigated using data from 45,533 storms. To our knowledge, rainfall storm patterns in Mazandaran province, located in northern Iran, have not been investigated yet. Therefore, the four objectives of this study are: i) Illustration of Huff curves for the selected stations in Mazandaran province, Iran; ii) Detection of storm types using the quartile method; iii) Extraction of design hyetographs based on median Huff curves; and iv) Using an innovative approach based on vertical distances of 20% and 80% Huff curves (denoted here by V) in three distinct times of storm duration, namely 25%, 50%, and 75%.

Material and Methods

The study area is Mazandaran province, located in northern Iran. Three stations, namely Sari, Abbasabad, and Firouzjah, were selected in the province for further analysis. Figure 1 shows the location of the sites and study area. Recorded daily rainfall data were gathered from the Iran Water Resources Management Company in digital form. In this study, rainfall events with cumulative rainfall depth ≥ 5 mm were selected for analysis. The minimum time interval between two consecutive rain events was set at 60 minutes. Storms were divided into three duration classes: i) 1-6 hours; ii) 6-12 hours; and iii) more than 12 hours. The number of storms varied from 151 in Abbasabad to 241 in Firouzjah. In this study, the Huff curves were plotted for each of the three sites, separately. Moreover, these curves were plotted for the three aforementioned duration classes and are shown in Figure 2.

Results and Discussion

Table 2 shows the percentage of rainfall received in each of the four time quartiles in the selected stations, for three distinct rainfall durations. Results showed that in all three stations, the maximum portion of rain in the 1-6 hour class was received in the second quartile. In the 6-12 hour duration class, the maximum portion of rain in Sari was received in the first quartile, while it was the second quartile for the other two stations (i.e., Abbasabad and Firouzjah). In the >12 hour class, the maximum portion of rain in stations Sari and Abbasabad was received in the second quartile, while it was the first quartile in Firouzjah station. Figure 5 shows the histogram of the mean percentage of rainfall received in different quartiles for distinct rainfall duration classes in the selected stations. Hyetographs for the selected sites were prepared for each of the three classes. Figure 6 shows the design storm hyetographs for the selected sites for the three distinct classes. Additionally, Figure 7 shows statistical details including d_{20} , d_{50} , d_{80} , and $V=d_{80}-d_{20}$ for Abbasabad station in the 1-6 hour duration. The obtained values of these statistics are presented in Table 3.

Conclusion

In this study, using data from 564 recorded storm events from rain gauges in three stations, the Huff curves were plotted for three distinct duration classes: 1-6 hours, 6-12 hours, and >12 hours. Results indicated that the shapes of the Huff curves varied among sites and across different durations. Furthermore, results showed that the Huff curve types for the stations were predominantly the second type (except for two cases). A considerable portion of rain (>80%) was received before the seventh decile of the rain duration. According to the innovative method, most storm variability in the 1-6 hour class occurred at Sari station, while it occurred at Abbasabad station for the 6-12 hour class, and at Firouzjah station for the >12 hour class. These findings will support optimum management of water resources in Mazandaran province. We recommend conducting similar research in other provinces of Iran.

Acknowledgment

The authors acknowledge the Iran Water Resources Management Company for providing the data used in the study.



بررسی تغییرپذیری رگبارها با استفاده از روش گورجی (مطالعه موردی: ایستگاه‌های منتخب استان مازندران)

ساینا وکیلی آذر^۱، یعقوب دین پژوه^{۲*}، سعید جهانبخش اصل^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۳ استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۶/۱۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۹/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۹	مطالعه الگوهای بارشی در ایستگاه‌های مختلف از دیدگاه هیدرولوژیکی از اهمیت بسزایی برخوردار است. در مطالعه حاضر، با استفاده از ۵۶۴ رگبار ثبت شده در سه ایستگاه باران‌سنجی استان مازندران (ساری، عباس‌آباد و فیروزجاه)، منحنی‌های هاف در سه کلاس بارشی (۱) کمتر از ۶، (۲) ۶-۱۲ و (۳) بیش از ۱۲ ساعت رسم شدند. با استفاده از منحنی‌های هاف ۵۰ درصد، رگبارها از دیدگاه چارکی مورد بررسی قرار گرفتند سپس، هایتوگراف بارش طرح برای ایستگاه‌های منتخب در کلاس‌های بارشی مختلف رسم شد. در ادامه، به منظور بررسی میزان تغییرپذیری رگبارها، از یک روش نوین که بر پایه فواصل قائم منحنی‌های هاف ۸۰ و ۲۰ درصد (که با ۷ نشان داده شد) و نیز مقادیر منحنی هاف ۵۰ درصد (d_{50}) در مقاطع زمانی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد است، استفاده گردید. نتایج نشان داد که تیپ اغلب رگبارها در کلاس‌های بارشی مختلف، از نوع چارک دومی بود. همچنین، نتایج حاکی از آن بود که در اغلب کلاس‌ها، درصد قابل توجهی از تمامی مقدار بارش (بیش از ۸۰ درصد)، تا دهک هفتم مدت دوام بارش نازل می‌شود. با حرکت به سمت دهک‌های آخر، میزان درصد بارش نازل شده کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج مشخص شد که بیشترین میزان تغییرپذیری رگبارها در کلاس‌های بارشی ۶-۰، ۱۲-۶ و بیش از ۱۲ ساعت به ترتیب، مربوط به ایستگاه‌های ساری، عباس‌آباد و فیروزجاه می‌باشد.
کلمات کلیدی: منحنی هاف هایتوگراف الگوهای طوفان بارشی تغییرپذیری زمانی بارش استان مازندران تحلیل چارکی طوفان‌های طرح هیدرولوژی ایران	

مقدمه

الگوی توزیع زمانی بارش و مسائل مرتبط با آن از چندین دهه گذشته توجه محققین زیادی را در سراسر جهان به خود جلب کرده و مطالعات زیادی پیرامون این موضوع انجام گرفته است. امروزه عواملی چون، افزایش جمعیت، ارتقاء سطح بهداشت، تغییرات اقلیمی و نیز بحران منابع آبی، لزوم توجه به الگوهای توزیع زمانی بارش را برای مدیریت صحیح منابع آبی و استفاده بهینه از آنها در شرایط کم آبی حائز اهمیت ساخته است. در این قسمت، به بررسی تعدادی از مطالعات صورت گرفته در رابطه با الگوهای توزیع زمانی بارش در سراسر جهان و همچنین، کشور ایران پرداخته می شود. با استفاده از ۲۶۱ رگبار ثبت شده در قسمت شرقی ایالت ایلینویز^۱ آمریکا، الگوهای توزیع زمانی رگبارهای آن منطقه مورد بررسی قرار داده شده است (Huff, 1967). نتایج نشان داد که، حدود ۴۲ درصد رگبارها، دارای مدت دوام یک تا ۱۲ ساعت بودند. همچنین، ۳۳ درصد رگبارها دارای مدت دوام ۱۲ تا ۲۴ ساعت و نیز ۲۵ درصد رگبارها دارای مدت دوام بیش از ۲۴ ساعت بودند.

در شهر سیدنی^۲ کشور استرالیا، از اطلاعات ۵۰ رگبار ثبت شده در دوره آماری ۵۱ ساله استفاده شده و هیتوگرافهای رگبارها براساس حداکثر بارشهای رخ داده در تداومهای مشخص رسم شده است (Pilgrim & Cordery, 1975). در ادامه، این هیتوگرافها بی بعد شدند و هیتوگراف باران طرح برای هر کدام از تداومهای بارشی بدست آمد. در ایالت کلمبیا^۳ (کشور کانادا)، با استفاده از رگبارهای ثبت شده در طول دوره آماری (۱۹۷۱-۱۹۹۰) الگوی توزیع مکانی و زمانی رگبارهای ماهانه، فصلی و سالانه بررسی شده است (Loukas & Quick, 1994). نتایج نشان داد که در فصلهای پاییز و زمستان میزان تغییر پذیری بارش کم و در فصل تابستان زیاد است. در منطقه گلد کوست^۴ کوئینزلند کشور استرالیا الگوهای زمانی بارش طرح برای تخمین سیلاب طرح استفاده شده است (Rahman, Islam, Rahman, Khan & Shrestha, 2006). الگوهای به دست آمده در این مطالعه با الگوهای رسم شده در سال ۱۹۸۷ در کتاب بارش و رواناب مقایسه گردید. نتایج نشان داد که هر چند مقادیر حداکثر عمق بارش بدست آمده، مشابه یافته های قبلی بود ولیکن، زمان وقوع حداکثر عمق بارش متفاوت بود. در مطالعه ای، به منظور پیش بینی سیلابها، از حد آستانه ای بارش در منطقه مادرسو، واقع در استان گلستان، در ناحیه شمال ایران استفاده شد (Golian, Saghaian & Maknoon, 2010). به نظر آنها عواملی مانند عمق بارش و توزیع زمانی و مکانی آن در مقدار دبی اوج سیلابها موثر است. منطقه کالابریا^۵ واقع در جنوب ایتالیا، الگوی توزیع زمانی رگبارها با استفاده از ۴۵۵۳۳ رگبار ثبت شده در بازه زمانی (۱۹۸۹-۲۰۰۸) بررسی گردید (Terranova & Iaquina, 2011). بدین منظور، از روش پروفیل بارش استاندارد شده^۶ (SRP) که مبتنی بر داده های واقعی بارش های محلی است، استفاده کردند. ایشان بدین منظور، رگبارها را به کلاس های

1 Illinois

2 Sydney

3 Colombia

4 Gold Coast

5 Calabria

6 Standardized Rainfall Profiles

مختلف بارشی تقسیم و منحنی‌های هاف را رسم کردند. الگوی توزیع زمانی رگبارها با توجه به رگبارهای به ثبت رسیده در عربستان سعودی بررسی شد (Awadallah & Younan, 2012). در این تحقیق دبی اوج سیلاب‌ها با تحلیل فرایند بارش-رواناب تخمین زده شد. در یک مطالعه دیگر، در منطقه گوانگجی کره با مساحت تقریباً ۱۲۵ هکتار، روش‌های تخلیه سیلاب حاصل از رگبارهای شدید، که به دنبال خود محیط زیست را آلوده می‌کردند، بررسی شده است (Baek et al., 2015). در مطالعه مذکور، از روش رسم منحنی‌های هاف برای مدل کردن هیتوگراف رگبارها استفاده شده است. در سه اقلیم مختلف کشور اسلوونی، الگوهای توزیع زمانی بارش با استفاده از روش‌های مختلف نظیر رسم منحنی‌های هاف و کدگذاری دودویی مورد بررسی واقع شد (Dolsak, Bezak & Sraj, 2016). در استان گوانگجو^۱ کشور چین، با استفاده از اطلاعات رگبارهای طراحی و شبیه‌سازی سیلاب-های شهری در بازه زمانی (۲۰۱۲-۲۰۰۸)، منحنی‌های هاف اصلاح شده ارائه گردید (Pan, Wang, Liu, Huang & Wang, 2017). در این مطالعه، از روش‌هایی نظیر شیکاگو، هاف و هیتوگراف‌های مثلثی برای به دست آوردن هیتوگراف‌های طراحی در منطقه مورد مطالعه، استفاده و نتایج آن‌ها را با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان داد که در منطقه مورد مطالعه، منحنی‌های هاف، بهتر از سایر روش‌ها، قادر به برازش و پیش‌بینی رویدادهای بارشی می‌باشند. در اسلوونی، با استفاده از هیتوگراف به دست آمده از منحنی‌های هاف ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد، سیلاب حاصل از بارش برای رودخانه‌های پایین دست شبیه‌سازی شد (Bezak, Sraj, Rusjan & Mikos, 2018). بدین منظور، ده سناریوی متفاوت برای دوره‌های بازگشت ۱۰ و ۱۰۰ ساله مورد بررسی قرار گرفت و نتایج بدست آمده با یکدیگر مقایسه شدند. اثرات تغییرپذیری بارش در ده ایستگاه باران‌سنجی واقع در نواحی مرکزی شرق اوهایو در ایالات متحده آمریکا در دوره آماری (۲۰۱۰-۱۹۳۹) مورد بررسی قرار داده شد (Gordji, Bonta & Altinakar, 2020). بدین منظور، منحنی‌های هاف ترسیم و عمق‌های بارش بی‌بعد در سه بازه زمانی بی‌بعد (۲۴، ۵۰ و ۷۴ درصد) تحلیل شد. در پژوهشی دیگر، تغییرات بارش در ونچوان چین با استفاده از منحنی‌های هاف مطالعه شد (Xlong, Tang, Gong & Chen, 2021) و آنگاه اثر این تغییرات روی دبی اوج سیلاب‌ها با مدل جفت شده HEC-HMS بررسی گردید. با استفاده از چارک‌های هاف اصلاح شده، الگوی رگبارها در دو ایستگاه کشور استرالیا مورد بررسی قرار گرفت (Dunkerley, 2022). بدین منظور، شدت بارش نیز در تعیین چارک‌ها دخالت داده شد و در هر چارک، فقط آن رگبارهایی که از یک حد آستانه‌ای معین تجاوز می‌کنند، برای تحلیل و بررسی انتخاب شد. در نهایت، معلوم شد که با این روش، ممکن است نوع چارک رگبارها تغییر یابد. در ایران نیز، مطالعاتی در خصوص رسم منحنی‌های هاف به منظور تحلیل و بررسی رگبارها، صورت گرفته است. به عنوان مثال، در استان خراسان بزرگ، الگوی توزیع زمانی رگبارها در تداوم‌های زمانی مختلف مطالعه و رگبارها را در چهار چارک زمانی متمایز جایابی شدند (Hatami-Yazd, Taghvaei-Abrishami & Ghahraman, 2005). نتایج نشان داد که در ۳۵ درصد موارد، حداکثر مقدار بارش در چارک دوم روی می‌دهد. در مطالعه‌ای الگوی توزیع زمانی بارش در نه ایستگاه استان سیستان و بلوچستان در بازه زمانی (۱۳۸۵-۱۳۴۷) رسم شده است (Khaksafidi, Noura, Biroudian & Najafi Nejad, 2010). بدین منظور، از داده‌های

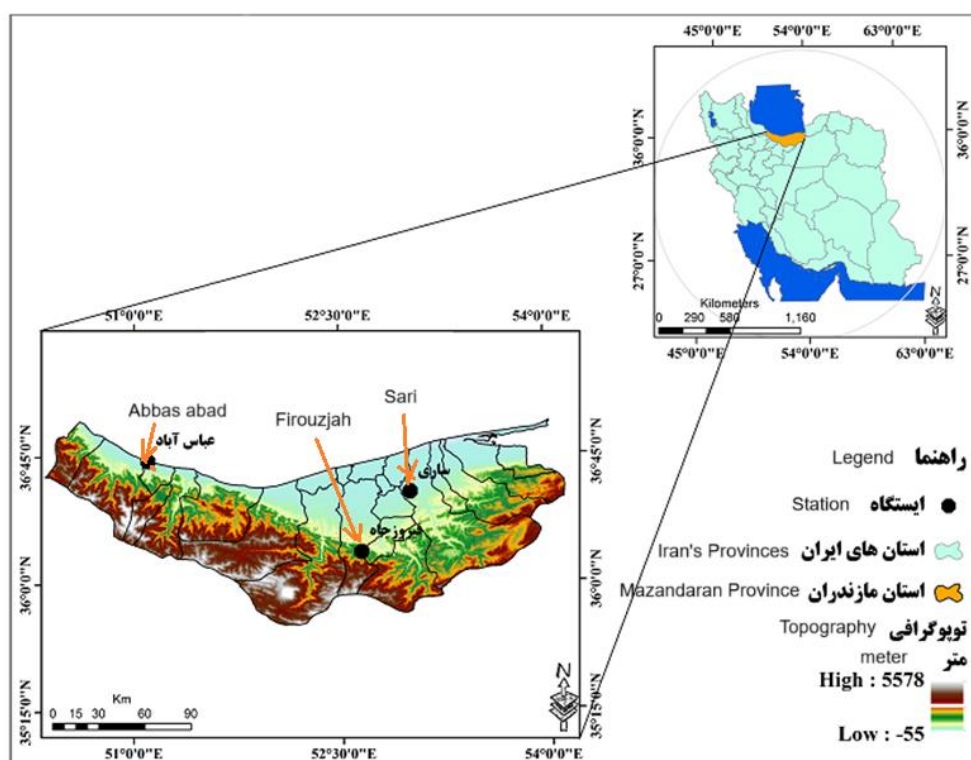
رگبارهای سنگین در تداوم‌های مختلف زمانی برای هر ایستگاه استفاده گردید و رگبارها در چهار چارک متمایز جای گرفتند و درصد مقدار بارش برای هر چارک محاسبه و رتبه‌بندی شد.

در مطالعه‌ای با استفاده از دو روش پیلگریم و هاف، الگوی توزیع زمانی بارش‌های روزانه بررسی شد (Moradnezehadi, Malekian, Jourgholami & Ghasemi, 2016). نتایج نشان داد که در رگبارهای ۲۴ ساعته، میزان قابل توجهی از بارش در چارک اول نازل می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر، رسم منحنی‌های هاف با استفاده از ۵۱۷ رگبار به‌ثبت رسیده در پنج ایستگاه باران‌سنجی استان آذربایجان شرقی انجام شده و نسبت‌های جدیدی را که بر پایه نسبت منحنی‌های هاف به‌دست آمده در بازه‌های زمانی مختلف بوده، ارائه کردند (Vakili azar & Dinpashoh, 2019). همچنین، در مطالعه‌ای دیگر، استفاده از ۴۱۸ رگبار ثبت شده در چهار ایستگاه باران‌سنجی استان آذربایجان شرقی (ایستگاه‌های تبریز، سراب، ملکان و هریس) منحنی‌های هاف برای کلاس‌های بارشی مختلف رسم شده است (Dinpashoh & Vakili Azar, 2019). در این مطالعه، با استفاده از مدل ریاضی لاجستیک، این منحنی‌ها بسط داده شده‌اند. نتایج نشان داد که مدل لاجستیک می‌تواند رگبارها را در ایستگاه‌های مورد مطالعه به خوبی برازش دهد. در استان خوزستان، با استفاده از رگبارهای ساعتی، برای به‌دست آوردن هیتوگراف‌های طراحی از منحنی‌های هاف رسم شده استفاده شده است (Alavi, Dinpashoh & Asadi, 2019). نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که در ایستگاه‌های مورد مطالعه، رگبارهای کوتاه مدت چارک دومی و رگبارهای بلند مدت چارک سومی هستند. در نواحی مختلف ایران، اثرات تغییرات جهانی اقلیم بر روی دو عنصر اقلیمی دما و بارش مطالعه شده است (Zarei, Khorshiddoust, Rezaeebanafshe & Rostamzadeh, 2023). نتایج این مطالعه نشان داد که میزان بارش در دهه‌های آتی، در اقلیم‌های مختلف کاهش خواهد یافت. بطوریکه در نواحی خیلی مرطوب و معتدل نیز، تا ۳۲ درصد کاهش میزان بارش محتمل است. الگوی‌های توزیع زمانی بارش در چهار ایستگاه حوضه رودخانه کارون در استان خوزستان مطالعه شده است (Dinpashoh & Alavi, 2024). در این بررسی، منحنی‌های هاف را برای کلاس‌های بارشی مختلف ترسیم و هیتوگراف رگبار طرح ارائه گردید.

با توجه به پیشینه تحقیق، در ایستگاه‌های مختلف استان مازندران، مطالعاتی گسترده پیرامون بررسی الگوهای توزیع زمانی بارش با استفاده از روش گردجی و همکاران (Gordji et al., 2020) انجام نگرفته است. بنابراین، اهداف این مطالعه شامل (۱) رسم منحنی‌های هاف در ایستگاه‌های مختلف استان مازندران به تفکیک کلاس‌های بارشی مختلف (۲) تعیین تیپ رگبارها از دیدگاه چارکی با توجه به منحنی هاف (۵۰ درصد، ۳) استخراج هیتوگراف بارش طرح براساس منحنی هاف (۵۰ درصد، ۴) استفاده از یک روش پیشنهادی نوین بر پایه فواصل قائم منحنی‌های هاف ۸۰ و ۲۰ درصد (که با نماد V نشان داده شده) در سه مقطع زمانی متمایز شامل ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد زمان ریزش باران می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، استان مازندران واقع در بخش مرکزی حاشیه جنوبی دریای خزر می‌باشد. این استان با توجه به دو عامل بارش و دما، دارای سه نوع آب و هوای: (۱) معتدل خزری: که جلگه‌های غربی و مرکزی این استان تا کوه‌پایه‌های شمالی رشته‌کوه‌های البرز را شامل می‌شود، (۲) معتدل کوهستانی: که با دوری از دریا و نیز افزایش تدریجی ارتفاع اراضی جلگه‌ای با حرکت به سوی ارتفاعات رشته‌کوه‌های البرز، در ناحیه‌ای به ارتفاع تقریباً ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متر، ایجاد می‌شود و (۳) سرد کوهستانی: که در قسمت قله کوهستان‌های مرتفع دامنه شمالی رشته‌کوه‌های البرز و نیز در ارتفاع بالای ۳۰۰۰ متر وجود دارد، می‌باشد (Anonymous, 2012). در این استان، سه ایستگاه باران‌سنجی شامل ساری، عباس‌آباد و فیروزجاه که دارای تعداد رگبارهای به‌ثبت رسیده بیشتری نسبت به سایر ایستگاه‌ها بودند و همچنین، از نظر جغرافیایی، پراکندگی مناسبی در سطح استان داشتند، برای بررسی رگبارها در این مطالعه انتخاب شدند. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان مازندران نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های باران‌سنجی منتخب در استان مازندران بر روی نقشه DEM منطقه
Fig. 1. Geographical location of Rain gauge stations in Mazandaran province on region DEM map

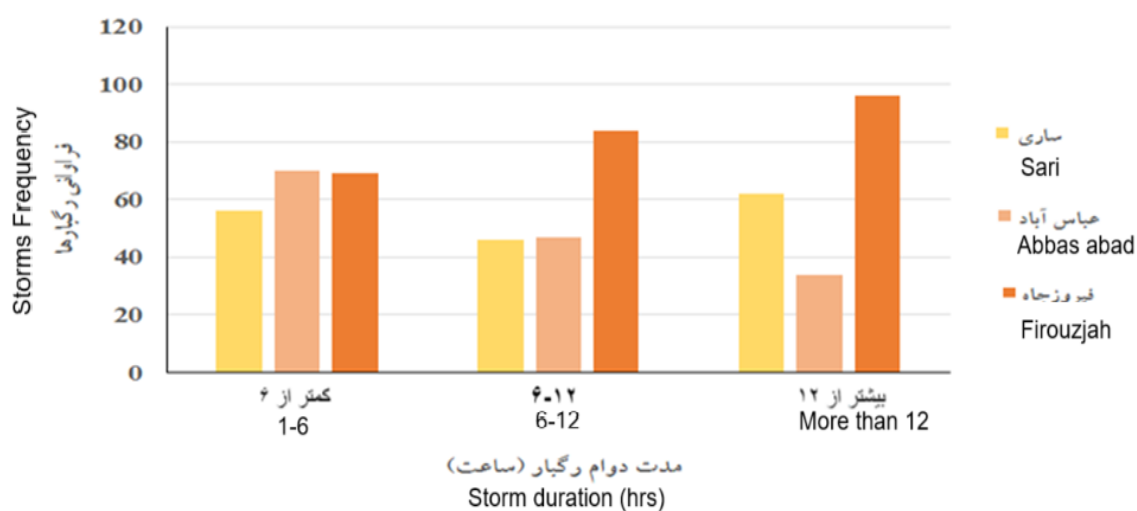
داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه، داده‌های مورد استفاده شامل رویدادهای بارشی به ثبت رسیده در فواصل زمانی یک دقیقه ای در دوره آماری (۱۳۸۸-۱۳۹۶) می‌باشد که از شرکت مدیریت منابع آب ایران در فرم دیجیتالی اخذ گردید. رویدادهایی انتخاب شدند که حداقل عمق بارش آن‌ها پنج میلیمتر و مدت دوام آن‌ها حداقل ۶۰ دقیقه بود. همچنین، برای تمیز دادن یک رگبار از رگبار بعدی، از معیار وجود وقفه زمانی شش ساعت استفاده شد. این معیار در مطالعات مشابه انجام شده (Huff, 1967; Terranova & Iaquina, 2011; Dolsak et al., 2016) نیز در نظر گرفته شده است. این امر بدین معنی است که، اگر فاصله زمانی بین اتمام یک رگبار تا آغاز رگبار دیگر بیش از شش ساعت باشد، این دو رگبار به صورت دو رگبار مجزا در نظر گرفته می‌شوند و در غیر این صورت، به‌عنوان یک رویداد بارشی تلقی می‌شوند. پس از انتخاب رویدادهای بارشی بر اساس معیارهای ارائه شده در هر یک از ایستگاه‌های باران‌سنجی منتخب، رگبارها براساس مدت دوام بارش در سه کلاس بارشی متمایز شامل (الف) یک تا ۶ ساعت، (ب) ۶-۱۲ و (ج) بیش از ۱۲ ساعت جای گرفتند. جدول ۱ مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب، میانگین بارش سالانه، تعداد کل رگبارها در هر ایستگاه را نشان می‌دهد. به‌طوریکه از جدول مشاهده می‌شود، دامنه تغییرات تعداد رگبارها از ۱۵۱ در ایستگاه عباس‌آباد تا ۲۴۹ در ایستگاه فیروزجاه متغیر است. همچنین، دامنه تغییرات ارتفاع ایستگاه‌ها از ۱۸- متر در ایستگاه عباس‌آباد تا ۷۸۷ متر در فیروزجاه تغییر می‌کند. شکل ۲ هیستوگرام فراوانی رگبارها را در هر یک از کلاس‌های بارشی برای ایستگاه‌های منتخب نشان می‌دهد. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که ایستگاه فیروزجاه، در کلاس بارشی بیش از ۱۲ ساعت، بیشترین تعداد رگبارها را دارا می‌باشد. درحالی‌که، ایستگاه عباس‌آباد در همین کلاس بارشی، کمترین تعداد رگبارها را به‌خود اختصاص داده است. در شکل ۳ نیز مقادیر درصد رگبارهای مورد مطالعه، در هر یک از کلاس‌های بارشی و در ایستگاه‌های مورد مطالعه، را نشان داده شده است.

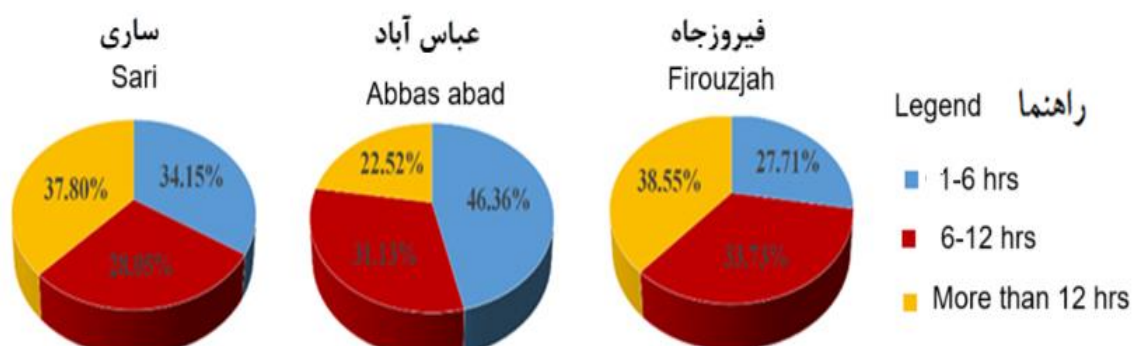
جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب و تعداد رگبارهای ثبت شده (۱۳۸۸-۱۳۹۶)

Table 1- Geographical characteristics of the selected stations and recorded storms (2009-2016)

نام ایستگاه Station name	عرض جغرافیایی latitude	طول جغرافیایی Longitude	ارتفاع (متر) Altitude (m)	میانگین بارش سالانه (میلیمتر) Mean of annual precipitation (mm)	تعداد کل رگبارها Total No. of storms
ساری Sari	36° 33 '	53° 01 '	17	792.1	164
عباس‌آباد Abbas abad	36° 44 '	51° 06 '	-18	1487.7	151
فیروزجاه Firuzjah	36° 12 '	52° 39 '	787	966.4	249



شکل ۲- هیستوگرام فراوانی رگبارها در کلاس‌های بارشی مختلف در ایستگاه‌های باران‌سنجی منتخب
 Fig. 2. Histogram of storms frequency in different duration classes in the selected rain gauge stations



شکل ۳- درصد رگبارهای مورد مطالعه در هر یک از کلاس‌های بارشی برای ایستگاه‌های باران‌سنجی منتخب

Fig. 3. Percentage of studied storms in each of the rainfall classes in the selected rain gauge stations

رسم منحنی‌های هاف

منحنی‌های هاف، اولین بار توسط محققى بنام هاف که در سال ۱۹۶۷، الگوهای توزیع زمانی رگبارهای شرق ایالت ایلینویز آمریکا را در کلاس‌های بارشی مختلف مورد بررسی قرار داد، ارائه شده است. در این مطالعه، برای رسم منحنی‌های هاف، ابتدا رگبارها بر اساس معیارهای ارائه شده انتخاب و با توجه به دوره تداوم در سه کلاس بارشی یک تا ۶ ساعت، ۶-۱۲ ساعت و بیش از ۱۲ ساعت جای گرفتند. ابتدا منحنی‌های عمق تراکمی رگبار تابعی از زمان تراکمی رگبار در هر یک از کلاس‌های بارشی برای ایستگاه‌های منتخب رسم گردید و در ادامه، منحنی‌های بی‌بعد عمق تجمعی رگبار (بین صفر تا ۱۰۰ درصد) تابعی از زمان تجمعی تداوم رگبار (بین صفر تا ۱۰۰ درصد) به‌دست آمد. در نهایت، با استفاده از توزیع‌های آماری رایج در هیدرولوژی، منحنی‌های هاف که به‌ترتیب، از پایین به بالا متعلق به منحنی‌های هاف ۱۰٪، ۲۰٪، ... و ۹۰٪ می‌باشند، در هر یک از کلاس‌های بارشی و ایستگاه‌های مورد مطالعه رسم شدند.

معرفی روش چارک‌ها با استفاده از منحنی هاف ۵۰ درصد

به‌منظور مقایسه رگبارها با استفاده از روش چارکی (Huff, 1967)، پس از ترسیم منحنی‌های هاف، منحنی میانی (۵۰ درصد) در نظر گرفته شد و میزان درصد عمق بارش رسیده در هر کدام از چارک‌های اول (۲۵-۰ درصد زمان بارش)، دوم (۵۰-۲۵ درصد زمان بارش)، سوم (۷۵-۵۰ درصد زمان بارش) و چهارم (۱۰۰-۷۵ درصد زمان بارش) به‌دست آمد. هر کدام از چارک‌ها که بیشترین میزان درصد عمق بارش را در بین چارک‌ها دریافت کرده بود، به‌عنوان الگوی بارشی آن کلاس بارشی در ایستگاه مورد مطالعه تعیین شد.

استخراج هیئوگراف رگبار طرح با استفاده از منحنی هاف ۵۰ درصد

به‌منظور استخراج هیئوگراف رگبار طرح، ابتدا منحنی‌های هاف ایستگاه مورد نظر رسم شد. با در نظر گرفتن منحنی هاف ۵۰ درصد، مقادیر تراکمی درصد عمق رگبار همان ایستگاه رسم شد. آنگاه، مقادیر جزئی بارش در فواصل زمانی گسسته (به حالت غیر تراکمی) بدست آمد و در نهایت، هیئوگرام بارش طرح از روی مقادیر جزئی برای آن ایستگاه رسم شد. این مراحل، برای همه ایستگاه‌ها و کلاس‌های بارشی سه گانه تکرار گردید.

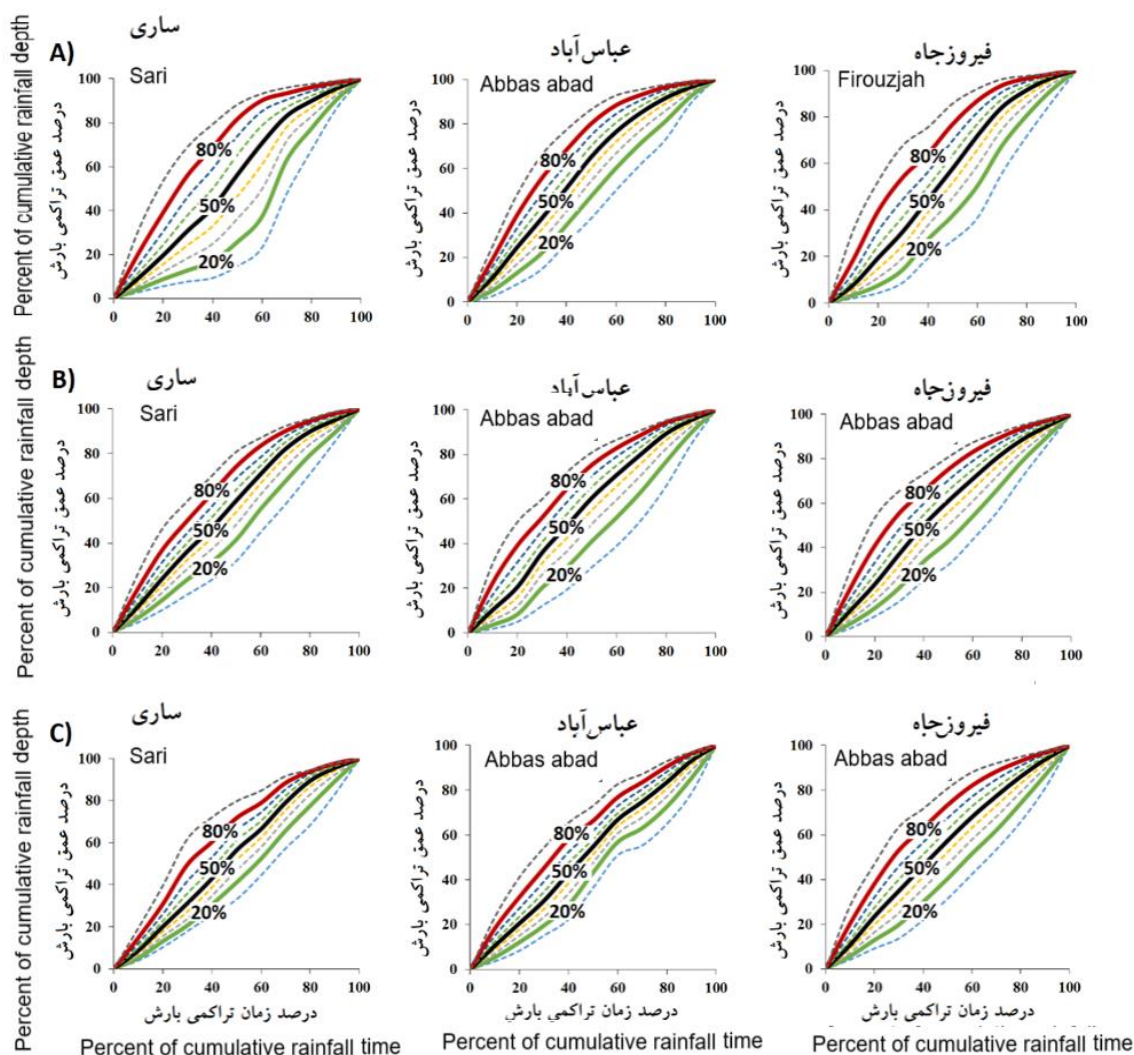
شرح روش نوین با محاسبه مقادیر بارش بی بعد d_{20} ، d_{50} و d_{80}

این روش نخستین بار، توسط گردجی و همکاران (Gordji et al., 2020) برای تحلیل و بررسی میزان تغییرپذیری رگبارهای شرق اوهایو در کشور آمریکا ارائه شده است. ایشان پس از رسم منحنی‌های هاف، با در نظر گرفتن منحنی هاف میانی (هاف ۵۰ درصد)، مقادیر عمق بارش بی‌بعد (d_{50}) را در سه بازه زمانی بی‌بعد (۲۴، ۵۰ و ۷۴ درصد) برای فصل‌های مختلف در ایستگاه‌های منتخب بدست آوردند. همچنین، مقادیر عمق بارش بی‌بعد را با استفاده از منحنی‌های هاف ۲۰ و ۸۰ درصد (d_{20} و d_{80}) در بازه‌های زمانی بی‌بعد مذکور

محاسبه و اختلاف آن‌ها را در هر یک از بازه‌ها با نماد V مشخص کردند. در مطالعه حاضر نیز از ایده مذکور استفاده شد. به‌طوریکه، پس از رسم منحنی‌های هاف در یک ایستگاه معین، سه منحنی هاف ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصد در نظر گرفته شد. سپس، مقادیر عمق بارش بی‌بعد در سه مقطع زمانی بی‌بعد ۲۵، ۵۰ و ۷۵ محاسبه گردید. آنگاه، مقادیر مربوط به منحنی هاف ۵۰ درصد که با (d_{50}) نشان داده شدند، در نظر گرفته و اختلاف بین مقادیر عمق بارش بی‌بعد دو منحنی هاف ۸۰ و ۲۰ درصد در مقاطع زمانی مذکور نیز محاسبه و با نماد V نمایش داده شدند. حال اگر مقدار V محاسبه شده در هر یک از بازه‌های زمانی مذکور بزرگتر باشد، این امر به این معنی است که میزان تغییرپذیری رگبارها در آن بازه زمانی بیشتر است و برعکس، هرچه مقدار V محاسبه شده کمتر باشد، میزان تغییرپذیری رگبارها در آن بازه زمانی کمتر است. در این مطالعه، مقادیر V و d_{50} در هر یک از کلاس‌های بارشی، برای ایستگاه‌های مورد مطالعه، محاسبه شد. مقایسه الگوی ایستگاه‌ها با توجه به مقادیر V و d_{50} به‌انجام رسید.

نتایج و بحث

شکل ۴ منحنی‌های هاف رسم شده در کلاس‌های بارشی مختلف را برای ایستگاه‌های باران‌سنجی منتخب در استان مازندران نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور ملاحظه می‌شود که در هر کلاس بارشی، تعداد نه منحنی که از پایین به بالا مربوط به منحنی‌های هاف ۱۰ تا ۹۰ درصد موسوم می‌باشد، رسم شده است. در این مطالعه، برای بررسی و تحلیل رگبارها، از سه منحنی ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصد که در روی شکل با رنگ‌های سبز، سیاه و قرمز به‌صورت پر رنگ نشان داده شده‌اند، استفاده شد. با توجه به منحنی‌های به‌دست آمده، می‌توان مشاهده کرد که فرم منحنی‌ها در یک ایستگاه، در کلاس‌های بارشی مختلف با یکدیگر متفاوت است. همچنین، در یک کلاس بارشی معین (مثلاً یک تا ۶ ساعت)، منحنی‌ها در ایستگاه‌های مختلف با یکدیگر تفاوت دارند و با توجه به اینکه هر دو محور افقی و قائم بی‌بعد شده‌اند، در نتیجه، از این منحنی‌ها می‌توان برای تحقیقات عملی در هیدرولوژی استفاده کرد. مثلاً اگر یک رویداد بارشی در ایستگاه ساری با مدت دوام ۲۲۰ دقیقه نازل شود، می‌توان با استفاده از منحنی هاف رسم شده برای ایستگاه ساری در کلاس بارشی یک تا ۶ ساعت و با در نظر گرفتن منحنی هاف ۵۰ درصد و میان‌یابی (با تناسب)، مقادیر درصد عمق بارش را در درصدهای زمانی مختلف به‌دست آورد.



شکل ۴- منحنی‌های هاف در کلاس‌های بارشی: A) یک تا ۶ ساعت، B) ۶-۱۲ ساعت و C) بیش از ۱۲ ساعت برای ایستگاه‌های باران‌سنجی منتخب در استان مازندران

Fig. 4. Huff curves in distinct classes: A) less than 6 hours, B) 6-12 hours, and C) more than 12 hours for the selected stations in Mazandaran province

نتایج مربوط به محاسبه مقادیر درصد عمق بارش رسیده در هر یک از چارک‌ها

به‌منظور محاسبه مقادیر درصد عمق بارش رسیده در هر یک از چارک‌ها، منحنی هاف ۵۰ درصد در نظر گرفته شد و مقادیر درصد عمق بارش در هر یک از چارک‌ها بدست آمد. این کار برای هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه در کلاس‌های بارشی مختلف انجام شد و نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به جدول ملاحظه می‌شود که در ایستگاه ساری و در کلاس بارشی یک تا ۶ ساعت، بیشترین میزان بارش در چارک دوم با ۳۱/۰۱ درصد نازل شده و پس از آن چارک سوم با ۳۰/۲۴ درصد و چارک اول با ۲۵/۳۱ درصد به ترتیب در

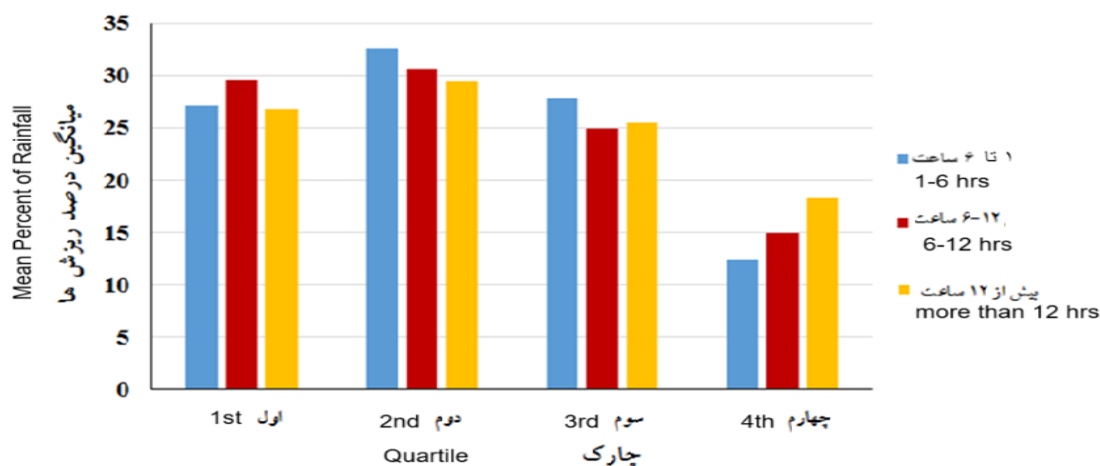
رتبه دوم و سوم جای گرفته‌اند. همچنین، ملاحظه می‌شود که در کلاس بارشی مذکور، در دو ایستگاه عباس‌آباد و فیروزجاه بیشترین میزان بارش به ترتیب، با $34/21$ و $32/61$ درصد در چارک دوم روی داده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در هر سه ایستگاه مورد مطالعه، رگبارها در کلاس بارشی کوتاه مدت (یک تا ۶ ساعت) چارک دومی هستند. این نتایج با یافته‌های پژوهش علوی و همکاران (Alavi et al., 2019) که در آن به تحلیل رگبارهای ساعتی در استان خوزستان پرداخته شده و معلوم شده که رگبارهای با مدت دوام کوتاه از نوع چارک دومی بودند، تا حدودی مشابه است. همچنین، نتایج به‌دست آمده با یافته‌های پژوهش ملائی و تلوری (Mollaie & Telvari, 2009) که در آن به تحلیل رگبارهای استان کهگیلویه و بویراحمد پرداخته و رگبارهای کوتاه‌مدت را از نوع چارک دومی ارائه کرده‌اند، همخوانی دارد. در کلاس بارشی ۱۲-۶ ساعت، ملاحظه می‌شود که در ایستگاه ساری بیشترین میزان بارش در چارک اول ($29/93$ درصد) روی داده است. در حالی که، در دو ایستگاه عباس‌آباد و فیروزجاه بیشترین میزان بارش در چارک دوم به‌ترتیب با $32/13$ و $30/7$ درصد نازل شده است. در کلاس بارشی بیش از ۱۲ ساعت، مشاهده می‌شود که در ایستگاه ساری و عباس‌آباد بیشترین میزان بارش با $30/75$ و $29/2$ درصد در چارک دوم اتفاق افتاده که با نتایج مربوط به تحلیل رگبارهای استان خراسان حاتم یزد و همکاران (Hatami-Yazd et al., 2005) که در آن رگبارهای بلندمدت چارک دومی گزارش شده، همخوانی دارد. در ایستگاه فیروزجاه و کلاس بارشی بیش از ۱۲ ساعت، بیشترین میزان بارش در چارک اول ($29/17$ درصد) رخ داده است. در حالت کلی، می‌توان نتیجه گرفت که به‌جز دو مورد (ایستگاه ساری در کلاس بارشی ۱۲-۶ ساعت و ایستگاه فیروزجاه در کلاس بارشی بیش از ۱۲ ساعت که چارک اولی بودند)، در بقیه موارد، الگوی بارشی رگبارها در کلاس‌های بارشی مختلف، از نوع چارک دومی است. همچنین، برای سه ایستگاه مورد مطالعه، میانگین‌های درصد ریزش‌های جوی مربوط به هر یک از چارک‌ها در کلاس‌های بارشی مختلف به‌دست آمد. به‌عنوان مثال، میانگین درصد ریزش‌ها در چارک اول و کلاس بارشی یک تا ۶ ساعت از میانگین سه عدد $25/31$ ، $31/01$ و $25/12$ که به‌ترتیب، مربوط به ایستگاه‌های ساری، عباس‌آباد و فیروزجاه می‌باشد، نتیجه شده است. مشابه همین روش، برای سایر چارک‌ها در کلاس‌های بارشی مختلف، مقادیر میانگین‌ها برای ایستگاه‌های مورد مطالعه حاصل شد. شکل ۵ نتایج را به‌صورت هیستوگرام و به‌تفکیک کلاس‌های بارشی نشان می‌دهد. با توجه به‌شکل مذکور ملاحظه می‌شود که در ایستگاه‌های مورد مطالعه، بیشترین میانگین درصد ریزش‌ها، در هر سه کلاس بارشی، متعلق به چارک دوم برای کلاس ۶-۱ ساعت (حدود ۳۳ درصد) و کمترین میانگین درصد ریزش‌ها متعلق به چارک چهارم و در همان کلاس بارشی (حدود ۱۳ درصد) می‌باشد.

جدول ۲- درصد ریزش بارش در هر یک از چارک‌های زمانی برای ایستگاه‌های منتخب به تفکیک

کلاس‌های بارشی

Table 2- Percentage of received rainfall in each time quartiles in the selected stations in distinct rainfall durations

کلاس بارشی (ساعت)			نوع چارک		نام ایستگاه Station name
بیش از ۱۲ ساعت More than 12 hours	۶ تا ۱۲ ساعت 6-12 hours	یک تا ۶ ساعت Less than 6 hours	Quartile type		
25.67	29.93	25.31	First	اول	ساری Sari
30.75	28.9	31.01	Second	دوم	
27.89	27.12	30.24	Third	سوم	
15.69	14.05	30.46	Fourth	چهارم	
25.6	28.41	31.01	First	اول	عباس‌آباد Abbas abad
29.12	32.13	34.21	Second	دوم	
24.42	24.29	23.12	Third	سوم	
20.78	15.17	11.66	Fourth	چهارم	
29.17	30.33	25.12	First	اول	فیروزجاه Firouzjah
28.19	30.7	32.61	Second	دوم	
24.35	23.5	30.06	Third	سوم	
18.29	15.47	12.21	Fourth	چهارم	



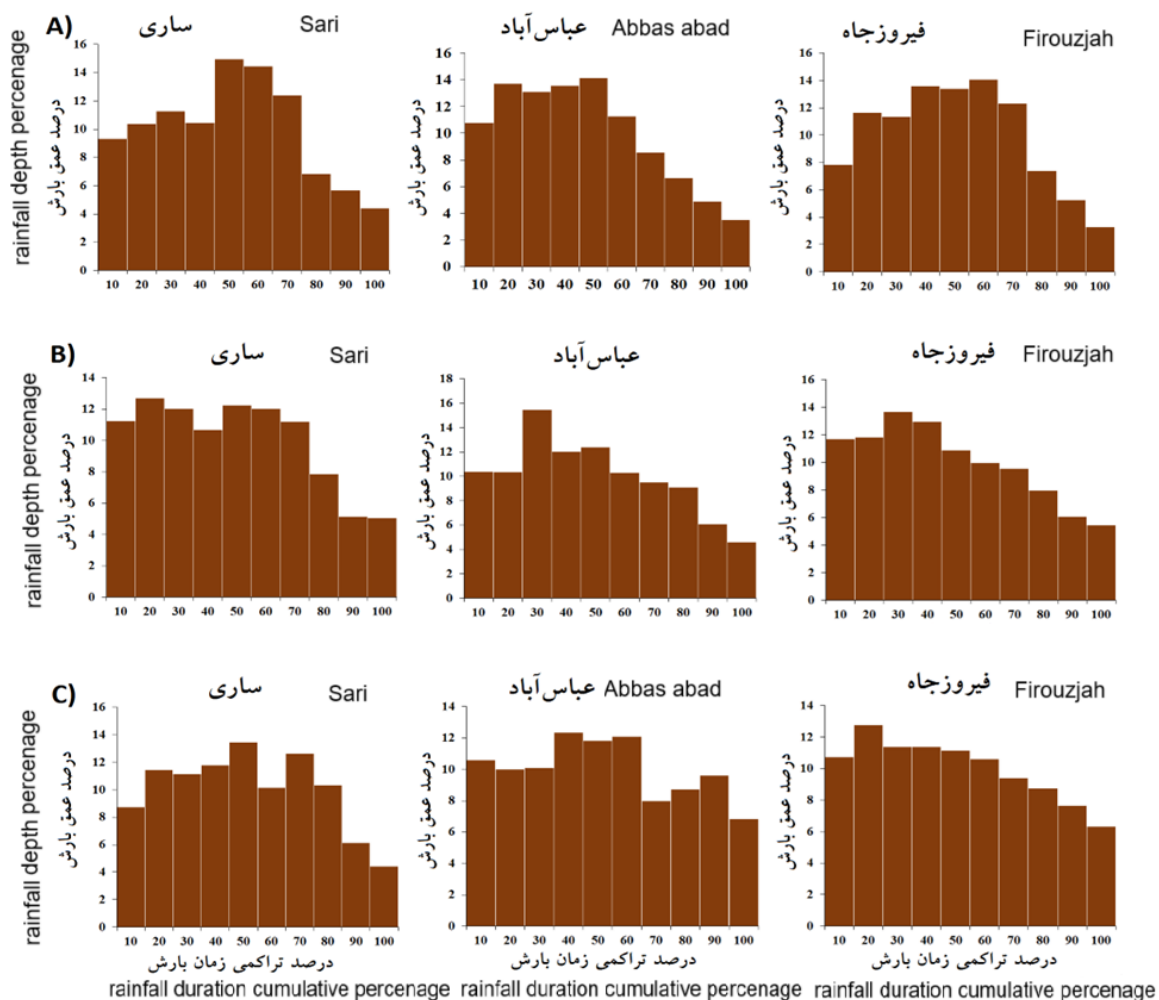
شکل ۵- هیستوگرام میانگین درصد ریزش‌ها در هر یک از چارک‌ها و کلاس‌های بارشی مختلف برای

ایستگاه‌های منتخب

Fig. 5. Histogram of the mean percentage of received rain in different quartiles and in distinct rainfall duration classes in the selected stations

نتایج مربوط به استخراج هیتوگراف رگبار طرح با استفاده از منحنی هاف ۵۰ درصد

با استفاده از منحنی‌های هاف ۵۰ درصد، هیتوگراف بارش طرح برای ایستگاه‌های منتخب در کلاس‌های بارشی مختلف بدست آمد (شکل ۶). با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که در ایستگاه‌های مورد مطالعه و کلاس‌های بارشی مختلف (بجز ایستگاه عباس‌آباد در کلاس بارشی بیش از ۱۲ ساعت)، درصد قابل توجهی از بارش (بیش از ۸۰ درصد)، تا دهک هفتم مدت دوام بارش نازل شده است و با جابجایی به سمت دهک‌های آخر، میزان درصد بارش نازل شده کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که در هیچکدام از ایستگاه‌ها و کلاس‌های بارشی، در یک بازه زمانی ۱۰ درصدی از مدت رگبار، بیش از ۱۶ درصد از عمق بارش نازل نشده است. همچنین، با توجه به شکل می‌توان تشخیص داد که در هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه و کلاس‌های بارشی، اوج بارش‌ها در کدام دهک رخ داده است. به‌عنوان مثال، با در نظر گرفتن ایستگاه ساری در کلاس بارشی یک تا ۶ ساعت، ملاحظه می‌شود که اوج بارش‌ها به‌ترتیب، در دهک‌های پنجم، ششم و هفتم نازل شده است.



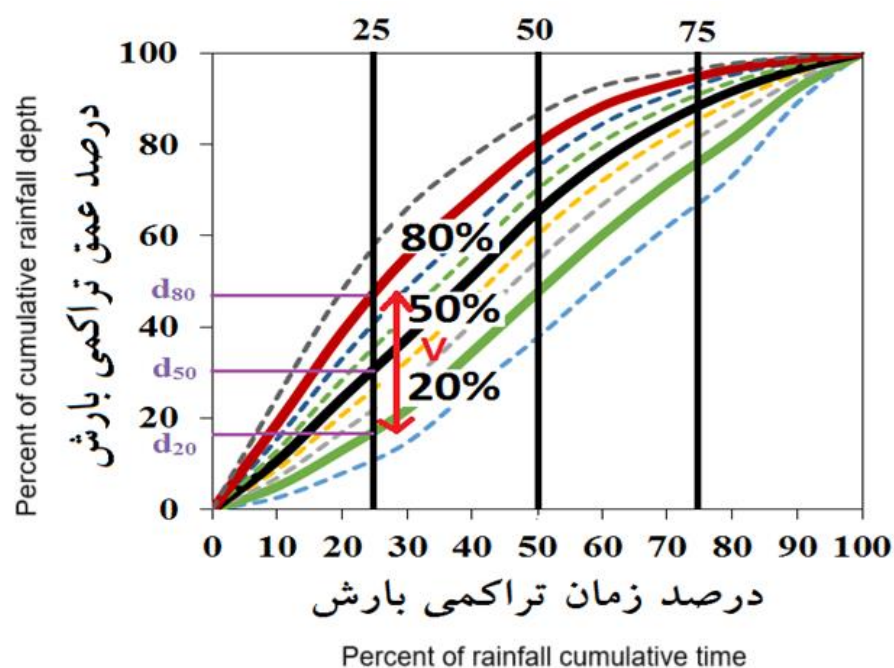
شکل ۶- هیتوگراف بارش طرح با استفاده از منحنی هاف ۵۰ درصد برای ایستگاه‌های منتخب در کلاس-

های بارشی (A) ۱ تا ۶ ساعت، (B) ۶-۱۲ ساعت و (C) بیش از ۱۲ ساعت

Fig. 6. Design rainfall hyetographs obtained using the 50% Huff curves for the selected stations in different classes; A) 1-6 hrs, B) 6-12 hrs, and C) more than 12 hrs

نتایج مربوط به روش محاسبه مقادیر بارش بی بعد d_{20} ، d_{50} و d_{80} با استفاده از روش نوین

در شکل ۷ نحوه محاسبه مقادیر d_{20} ، d_{50} و d_{80} در بازه زمانی بی بعد ۲۵ درصد، برای ایستگاه نمونه عباس آباد، در کلاس بارشی یک تا ۶ ساعت نشان داده شده است. به همین ترتیب، می توان در ۵۰ و ۷۵ درصد زمان بارش نیز مقادیر مذکور را به دست آورد. در ادامه، مقادیر d_{20} ، d_{50} و d_{80} در ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد زمان بارش برای همه کلاس های بارشی و ایستگاه های منتخب بدست آمد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به جدول ملاحظه می شود که در کلاس بارشی یک تا ۶ ساعت، بیشترین مقدار V در ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد زمان بارش، به ترتیب، با ۳۶/۸۵، ۵۵/۹۶ و ۲۴/۴۹ درصد متعلق به ایستگاه ساری می باشد. این امر نشان می دهد که میزان تغییرپذیری رگبارهای ایستگاه ساری در کلاس بارشی یک تا ۶ ساعت بیشتر از دو ایستگاه دیگر است. در کلاس بارشی ۱۲-۶ ساعت، بیشترین مقدار V در ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد زمان بارش، به ترتیب با مقادیر ۳۱/۲۱، ۳۴/۲۶ و ۲۱/۴۷ درصد متعلق به ایستگاه عباس آباد می باشد و در کلاس بارشی بیش از ۱۲ ساعت، بیشترین مقدار V در ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد زمان بارش، به ترتیب با مقادیر ۳۲/۹۶، ۲۹/۲۳ و ۲۲/۶۲ درصد به ایستگاه فیروزجاه تعلق دارد. همه این ارقام به صورت پررنگ در جدول مشخص شده اند. لازم به ذکر است که در یک کلاس بارشی معین، هرچه مقدار V در هر یک از ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد زمان بارش بیشتر باشد، میزان شباهت الگوی ریزشی رگبارها در آن کلاس بارشی کمتر بوده و برعکس، هر چه مقدار V کمتر باشد، الگوی ریزشی رگبارها مشابه هم در نظر گرفته می شود. همچنین، با در نظر گرفتن منحنی هاف ۵۰ درصد (d_{50})، ملاحظه می شود که در کلاس بارشی یک تا ۶ ساعت، بیشترین مقدار d_{50} در ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد زمان بارش، به ترتیب با ۳۱/۰۱، ۶۵/۲۲ و ۸۸/۳۴ درصد متعلق به ایستگاه عباس آباد می باشد. در کلاس بارشی ۱۲-۶ ساعت، بیشترین مقدار d_{50} در ۲۵ و ۵۰ درصد زمان بارش، به ترتیب با ۳۰/۳۳ و ۶۱/۰۳ درصد متعلق به ایستگاه فیروزجاه می باشد. در حالی که در ۷۵ درصد زمان بارش بیشترین مقدار d_{50} با ۸۵/۹۵ درصد مربوط به ایستگاه ساری است. در کلاس بارشی بیش از ۱۲ ساعت، بیشترین مقدار d_{50} در ۲۵ و ۵۰ درصد زمان بارش، به ترتیب با ۲۹/۱۷ و ۵۷/۳۶ درصد متعلق به ایستگاه فیروزجاه و در ۷۵ درصد زمان بارش با ۸۴/۳۱ درصد متعلق به ایستگاه ساری است. در حالت کلی، می توان نتیجه گرفت که اگر در یک ایستگاه معین و کلاس بارشی مشخص، مقدار d_{50} در هر یک از بازه های زمانی (۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد) بیشتر باشد، این امر حاکی از آن است که درصد بارش نازل شده در آن بازه زمانی برای آن ایستگاه در کلاس بارشی مذکور بیشتر از سایر ایستگاه ها است. با مقایسه نتایج به دست آمده در این مطالعه، با نتایج مطالعه گردجی و همکاران (Gordji et al., 2020) ملاحظه می شود که در این مطالعه، بیشترین مقدار V در حالت کلی در موقعیت های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد زمان رگبار برابر با ۰/۳۶۹، ۰/۵۶ و ۰/۲۴۵ می باشد. در حالیکه، معادل این ارقام در مطالعه گردجی و همکاران (Gordji et al., 2020) برابر با ۰/۵۹، ۰/۵۸۱ و ۰/۴۴۶ بود. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که میزان تغییرات الگوی بارشی رگبارها در شرق اوهایو نسبت به ایستگاه های مورد مطالعه در استان مازندران بیشتر است. به عبارت دیگر، الگوهای بارشی رگبارهای استان مازندران نسبت به الگوهای بارشی رگبارهای شرق اوهایو مشابهت بیشتری دارد.



شکل ۷- منحنی‌های هاف ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصد برای ایستگاه نمونه عباس آباد (سه خط قائم بی بعد برای نمایش مقادیر d_{80} ، d_{50} ، d_{20} و V رسم شده‌اند)

Fig. 7. Huff curves of 20, 50, and 80 percent for a representative station Abbas abad (three dimensionless vertical lines shows $d_{20\%}$, $d_{50\%}$, and $d_{80\%}$, also V is shown)

جدول ۳- مقادیر d_{20} ، d_{50} ، d_{80} و V در ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد زمانی رگبار برای ایستگاه‌های باران‌سنجی

منتخب به تفکیک کلاس‌های بارشی

Table 3- Values of d_{20} ، d_{50} ، and d_{75} time percentage of storm for the selected rain gauges in distinct rainfall durations

درصد زمانی بارش Rainfall time percentage			آماره Statistics	ایستگاه Station
75%	50%	25%		
1-6 hrs class کلاس ۱ تا ۶ ساعت				
70.29	25.75	10.85	d_{20}	ساری Sari
86.55	56.31	25.31	d_{50}	
94.78	81.71	47.7	d_{80}	
24.49	55.96	36.85	V	
76.24	47.53	17.5	d_{20}	عباس‌آباد Abbas abad
88.34	65.22	31.01	d_{50}	
94.82	80.19	47.27	d_{80}	
18.48	32.66	29.77	V	
74.1	37.52	11	d_{20}	فیروزجاه Firouzjah
87.79	57.73	25.12	d_{50}	
95	76.78	46.88	d_{80}	
20.9	39.26	35.88	V	
6-12 hrs class کلاس ۶-۱۲ ساعت				
73.5	41.36	18.91	d_{20}	ساری Sari
85.95	58.83	29.93	d_{50}	
92.33	74.09	43.22	d_{80}	
18.83	32.73	24.31	V	
70.16	41.1	14.4	d_{20}	عباس‌آباد Abbas abad
84.83	60.54	28.41	d_{50}	
91.63	75.36	45.61	d_{80}	
21.47	34.26	31.21	V	
72.53	42.93	17.39	d_{20}	فیروزجاه Firouzjah
84.53	61.03	30.33	d_{50}	
91.34	75.23	48.19	d_{80}	
18.81	32.3	30.8	V	
More than 12 hrs class کلاس بیش از ۱۲ ساعت				
71.69	41.07	16.93	d_{20}	ساری Sari
84.31	56.42	25.67	d_{50}	
91.22	71.77	40.24	d_{80}	
19.53	30.7	23.31	V	
67.9	43.25	15.86	d_{20}	عباس‌آباد Abbas abad
79.22	54.8	25.6	d_{50}	
87.07	66.35	38.77	d_{80}	
19.17	23.1	22.91	V	
68.08	40.37	16.34	d_{20}	فیروزجاه Firouzjah
81.71	57.36	29.17	d_{50}	
90.7	73.33	47.57	d_{80}	
22.62	32.96	29.23	V	

نتیجه گیری

در این مطالعه با استفاده از ۵۶۴ رگبار ثبت شده در دوره آماری (۱۳۸۸-۱۳۹۶)، منحنی‌های هاف در سه کلاس بارشی یک تا ۶ ساعت، ۶-۱۲ ساعت و بیش از ۱۲ ساعت برای سه ایستگاه منتخب در استان مازندران رسم شد. نتایج نشان داد که فرم منحنی‌ها در یک ایستگاه معین، در کلاس‌های بارشی مختلف با یکدیگر متفاوت است. همچنین، در یک کلاس بارشی معین (مانند یک تا ۶ ساعت)، فرم منحنی‌ها در ایستگاه‌های مختلف با یکدیگر تفاوت دارند. با استفاده از منحنی‌های هاف ۵۰ درصد، رگبارها از دیدگاه چارکی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن بود که در کلاس‌های بارشی مختلف (بجز دو مورد)، تیپ بارشی اغلب رگبارها از نوع چارک دومی بود. همچنین، با استفاده از منحنی‌های هاف ۵۰ درصد، هیئتوگراف بارش طرح برای ایستگاه‌های منتخب در کلاس‌های بارشی مختلف به دست آمد. نتایج نشان داد که در اغلب ایستگاه‌های مورد مطالعه و کلاس‌های بارشی، درصد قابل توجهی از بارش (بیش از ۸۰ درصد)، تا دهک هفتم مدت زمان دوام بارش نازل می‌شود و با حرکت به سمت دهک‌های آخر، میزان درصد بارش نازل شده کاهش می‌یابد. در ادامه، به منظور تحلیل و بررسی میزان تغییرپذیری رگبارهای ایستگاه‌های منتخب در کلاس‌های بارشی مختلف از روش جدید استفاده شد که در آن با استفاده از منحنی‌های هاف ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصد، مقادیر عمق بارش بی‌بعد برای سه مقطع زمانی بی‌بعد ۲۵، ۵۰ و ۷۵ بدست آمد. مقادیر مربوط به منحنی هاف ۵۰ درصد با d_{50} مشخص و اختلاف بین دو منحنی هاف ۸۰ و ۲۰ درصد در مقاطع زمانی مذکور محاسبه و با نماد V نشان داده شد. نتایج نشان داد که بیشترین میزان تغییرپذیری رگبارها در کلاس‌های بارشی یک تا ۶ ساعت، ۶-۱۲ ساعت و بیش از ۱۲ ساعت به ترتیب، مربوط به ایستگاه‌های ساری، عباس‌آباد و فیروزجاه بود. با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه، الگوی توزیع زمانی رگبارها با استفاده از روش‌های به کار برده شده در مطالعه اخیر، مورد بررسی قرار نگرفته است، به نظر می‌رسد، نتایج این مطالعه می‌تواند در مدیریت و استفاده بهینه منابع آبی و همچنین، کنترل و هشدار به موقع سیلاب‌ها با توجه به شرایط اقلیمی منطقه موثر باشد. پیشنهاد می‌شود مطالعاتی مشابه در استان‌های دیگر با شرایط آب و هوایی مختلف انجام شود و نتایج آن با نتایج بدست آمده از این مطالعه مقایسه شود.

سپاسگزاری

از شرکت مدیریت منابع آب ایران بخاطر قرار دادن داده‌های مورد نیاز این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

References

- Alavi, E. S., Dinpashoh, Y., & Asadi, E. (2019). Analysis of hourly storms for the purpose of extracting design hyetographs using the Huff Method. *Geography and Environmental Planning*, 30(3), 41-58. [In Persian] <https://doi.org/10.22108/gep.2019.116484.1141>
- Anonymous. (2012). Climate of Mazandaran Province. Formal Website of Young Correspondents Club; Economic Diploma. (Date of Access 01 12 2024). [In Persian] <https://www.yjc.ir/fa/news/4789307/>
- Awadallah, A. G., & Younan, N. S. (2012). Conservative design rainfall distribution for application in arid regions with sparse data. *Journal of Arid Environments*, 79, 66-75. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.11.032>
- Baek, S. S., Choi, D. H., Jung, J. W., Lee, H. J., Yoon, K. S., & Cho, K. H. (2015). Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban area, Korea: experimental and modeling approach. *Water Research*, 86, 122-131. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.038>
- Bezak, N., Sraj, M., Rusjan, S., & Mikos, M. (2018). Impact of the rainfall duration and temporal rainfall distribution defined using the Huff curves on the hydraulic flood modelling results. *Geosciences*, 8(2), 69. <https://doi.org/10.3390/geosciences8020069>
- Dinpashoh, Y., & Alavi, E. (2024). Derivation of Huff curves for the four stations in Great Karun River in Khuzestan provinces. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 54.1(114), 115-130. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jcee.2022.28050.1678>
- Dinpashoh, Y., & Vakili Azar S. (2019). Temporal analysis of storms in East of Urmia Lake using the Huff curves method. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 8(3), 27-44. [In Persian] <https://sanad.iau.ir/en/Article/829069>
- Dolsak, D., Bezak, N., & Sraj, M. (2016). Temporal characteristics of rainfall events under three climate types in Slovenia. *Journal of Hydrology*, 541, 1395-1405. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.047>
- Dunkerley, D. (2022). Huff quartile classification of rainfall intensity profiles ('storm patterns'): A modified approach employing an intensity threshold. *Catena*, 216, 106371-106384. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106371>
- Golian, S., Saghafian, B., & Maknoon, R. (2010). Derivation of probabilistic thresholds of spatially distributed rainfall for flood forecasting, *Water Resources Management*, 13(26), 3547-3559. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-010-9619-7>
- Gordji, L., Bonta, J. V., & Altinakar, M. S. (2020). Climate- related trends of within-storm intensities using dimensionless temporal storm distributions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(5), 1-31. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001911](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001911)
- Hatami-Yazd, A., Taghvaei-Abrishami, A., & Ghahraman, B. (2005). Rainfall temporal pattern for Khorasan province, Iran. *Iran-Water Resources Research*, 1(3), 54-64. [In Persian] https://www.iwrr.ir/article_15168.html?
- Huff, F. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research*, 3(4), 1007- 1019. <https://doi.org/10.1029/WR003i004p01007>

- Khaksafidi, A., Noura, N., Biroudian, N., & Najafi Nejad, A. (2010). Rainfall temporal distribution patterns in Sistan & Balouchestan Province (Iran). *Journal of Water and Soil Conservation*, 17(1), 45-61. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222069.1389.17.1.3.0>
- Loukas, A., & Quick, M. C. (1994). Precipitation distribution in coastal British Columbia. *Water Resources Bulletin*, 30(4), 705-725. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1994.tb03324.x>
- Mollaie, A., & Telvari, A. R. (2009). Determination of rainfall temporal pattern in Kohkiluyeh and Boyerahmad province by Pilgrim method. *Watershed Engineering and Management*, 1(2), 70-77. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519300.1388.1.2.1.3>
- Moradnezehadi, M., Malekian, A., Jourgholami, M., & Ghasemi, A. (2016). Daily rainfall temporal distribution patterns and its relations with short-term precipitations in coastal-forest areas (Case study: Nowshahr Station, Northern Iran). *Journal of Range and Watershed Managment*, 69 (2), 475-485. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jrwm.2016.61697>
- Pan, C., Wang, X., Liu, L., Huang, H., & Wang, D. (2017). Improvement to the Huff curve for design storms and urban flooding simulations in Guangzhou, China. *Water*, 9, 411-429. <https://doi.org/10.3390/w9060411>
- Pilgrim, D. H., & Cordery, I. (1975). Rainfall temporal patterns for design flood. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 101, 81-95. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004197>
- Rahman, A., Islam, S. M., Rahman, K., Khan, S., & Shrestha, S. (2006). A windows based program to derive design rainfall temporal patterns for design flood estimation. *Proceeding of 30 th Hydrology and Water Resources Symposium, Dec. Tasmania*, 1881-1886.
- Terranova, O. G., & Iaquina, P. (2011). Temporal properties of rainfall events in Calabria (Southern Italy). *Natural Hazards Earth System Sciences*, 11, 751-757. <https://nhess.copernicus.org/articles/11/751/2011/>
- Vakili Azar, S., & Dinpazhoh, Y. (2019). Development of Huff curves for the five selected stations in the East of Urmia Lake. *Water and Soil*, 32(6), 1109-1123. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.v32i6.72443>
- Xlong, J., Tang, C., Gong, L., & Chen, M. (2021). Variability of rainfall time distributions and their impact on peak discharge in the Wenchuan County, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 7113-7129. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02376-2>
- Zarei, Y., Khorshiddoust, A. M., Rezaee Banafshe, M., & Rostam zadeh, H. (2023). Assessing the impacts of global climate change on climate elements of temperature and precipitation in disparate climatic zones of Iran using RCP scenarios. *Journal of Geography and Planning*, 27(83), 63-71. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gp.2023.10791>



Estimating the amount of erosion and sedimentation in Zimkan watershed basin in Kermanshah province with an emphasis on influencing variables

Shahram Roostaei^{a*}, Seyyed Asadullah Hijazi^b, Hedieh Shirzadi^c

^a Professor in Geomorphology, Department of Physical Geography, Tabriz University, Tabriz Iran

^b Associate Professor in Geomorphology, Department of Physical Geography, Tabriz University, Tabriz, Iran

^c Ph.D in Geomorphology, Department of Physical Geography, Tabriz University, Tabriz, Iran

Article Info

Abstract

Article history

Received :11 December 2022

Received in revised form :

31 January 2023

Accepted: 24 February 2023

Available online :

21 March 2025

Keywords:

Zimkan watershed Basin, Soil erosion modeling, EPM (Erosion Potential Method), MPSIAC (Modified PSIAC), Sediment yield estimation, GIS-based assessment

Soil erosion is one of the most important problems that has affected human life in recent years. The type and intensity of soil erosion in a region depend on climatic conditions, altitude, soil, and land use. Meanwhile, the importance of land use is greater than other factors due to the effective role of humans in influencing it. In this research, to estimate the amount of erosion and sedimentation in the Zimkan watershed, we used two methods, MPSIAC and EPM, each of which evaluates nine factors (geology, soil, climate, water flow, elevation, vegetation, land use, landform, and river erosion) and four factors (erosion, land use, soil sensitivity, and the average slope of the basin), respectively. Then, ArcGIS software and Sentinel-2 satellite sensor images were used in the ENVI 5.3 environment to prepare the related layers. The results showed that the erosion values in the MPSIAC and EPM models were 5,142.9 and 6,401.2 tons per year, respectively, and the amounts of sediment were 2,461.25 and 3,624.72 tons per year, respectively. The erosion class and severity of the basin's erodibility, in terms of soil loss, are in critical condition. The highest intensity of erosion and sediment production was observed in the outlet sections of the basin. It is necessary to implement management and protection policies at the watershed level. It was also found that the results of the MPSIAC method are closer to the actual observations in the basin than those of the EPM method.

*.Corresponding author : Dr. Shahram Roostaei

E-mail address: roostaei@tabrizu.ac.ir

How to cite this article: Roostaei, S., Shirzadi, H., & Hijazi, E. (2025). Estimating the amount of erosion and sedimentation in Zimkan catchments in Kermanshah province with an emphasis on influencing variables. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), pp. 210-226. DOI: <https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79388.1293>



©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 amount of erosion in a watershed can be determined if there are sufficient records of discharge and sediment data by applying statistical methods. However, in many basins across the country, there are no measurements of soil erosion and sediment production, which requires the use of experimental methods to estimate soil erosion. To estimate the amount of sediment and erosion in a region, there are many methods, including the modified global equation of soil erosion. This model is a suitable method for calculating soil losses because the results show no significant difference from those measured in the region.

Material and Methods

The Zimkan or Zamkan river basin is located in the north of Dalaho city and the west of Kermanshah province. The drainage pattern of this basin is rectangular with an area of 2,324 square kilometers and flows from the southeast to the northwest. This basin is bounded from the west by the Piran basin and from the north by the Posht Teng basin and the Lima river basin. The basin is located at the geographical coordinates of 46°4'30" to 46°11'8" east longitude and 34°35'44" to 34°22'56" north latitude. The research was conducted using two models for comparison, and the methodologies of these two models and their outputs are introduced below.

EPM Model

Introduced in 1988 by Gavrilovic at the international conference on river regimes for estimating the amount of erosion and sedimentation, this model was applied after 40 years of research on erosion plots in Yugoslavia. This model estimates reliable and acceptable results of the erosion rate with four main factors. The factors of this model are mentioned in the table, and after scoring and processing the data with the help of ARC/GIS software, they were calculated.

MPSIAC Model

The PSIAC method was presented in 1968 by the Water Management Committee in the United States for calculating the intensity of soil erosion and sediment production in arid and semi-arid areas. This method was modified in 1982. In Iran, this model was implemented for the first time in 1973 in the Dez Dam watershed, and it evaluates nine factors to calculate erosion and sediment production. Each of these factors has been examined from both quantitative and qualitative perspectives, with five qualitative grades and quantitative scores ranging from -10 to +25.

Results and Discussion

This research was conducted with the aim of estimating the erosion and sedimentation of the study area using EPM and MPSIAC models and comparing the results with actual measurements. To present the results, the final layers were classified and information was extracted from them. By preparing the required maps from the layers of the previous stage and analyzing the obtained information layers, appropriate outputs were prepared.

Conclusion

The difference between the calculated values of the annual sediment amounts by the MPSIAC method is small. This is in contrast to the EPM model, where this difference is large, demonstrating the accuracy of the MPSIAC model in estimating the amount of sediment.

Additionally, the low erosion class covers the largest area of the basin, accounting for about 58% of the total area, while the high and medium erosion classes cover nearly the same area. This nevertheless indicates that the study area is predominantly affected by erosion. Finally, the specific and annual sediment yields of the Zimkan catchment calculated by the EPM and MPSIAC models show that the sediment delivery ratio and specific erosion estimates in this basin differ significantly between the two models. Based on this, the EPM model produced higher estimates for both parameters. Therefore, it can be concluded that the MPSIAC model is more reliable, as its outputs are closer to reality.



برآورد میزان فرسایش و رسوب حوضه آبریز زیمکان در استان کرمانشاه با تأکید

بر متغیرهای تأثیرگذار

شهرام روستایی^{۱*}، سید اسداله حجازی^۲، هدیه شیرزادی^۳

استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۳دانش آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۵ کلمات کلیدی: حوضه آبریز زیمکان مدلسازی فرسایش خاک روش پتانسیل فرسایش (EPM) روش اصلاح شده PSIAC (MPSIAC) برآورد بار رسوب ارزیابی مبتنی بر GIS	فرسایش خاک از مهمترین مشکلاتی است که طی سال‌های اخیر زندگی بشر را تحت الشعاع قرار داده است. نوع و شدت فرسایش خاک در یک منطقه، تابع شرایط اقلیمی، پستی بلندی زمین، خاک و کاربری اراضی است. که در این میان اهمیت کاربری اراضی به دلیل نقش مؤثر انسان بر آن نسبت به دیگر عوامل زیادت‌تر است. در این پژوهش جهت برآورد میزان فرسایش و رسوب حوضه آبریز زیمکان با بکارگیری دو روش MPSIAC و EPM، که هرکدام به ترتیب نه عامل (زمین-شناسی، خاک، آب‌وهوا، روان آب، پستی‌بلندی، پوشش گیاهی، کاربری اراضی، وضعیت فعلی فرسایش و فرسایش رودخانه ای) و چهارعامل (فرسایش، استفاده از زمین، حساسیت خاک و شیب متوسط حوضه) را مورد ارزیابی قرار می‌دهند. و در ادامه از نرم افزار ArcGIS و تصاویر سنجنده ماهواره Sentinel2 در محیط ENVI 5.3 جهت تهیه لایه‌های مرتبط استفاده گردید. نتایج نشان داد که مقادیر فرسایش در دو مدل MPSIAC و EPM به ترتیب ۵۱۴۲/۹، ۶۴۰۱/۲ تن در سال و میزان رسوب به ترتیب ۲۴۶۱/۶۳، ۳۶۲۴/۷۲ تن در سال و کلاس و شدت فرسایش‌پذیری حوضه از لحاظ هدر رفت خاک در وضعیت شدید قرار دارد. که بیشترین شدت فرسایش و تولید رسوب در بخش‌های جنوب و جنوب غرب حوضه مشاهده شد. لذا اعمال سیاست‌های مدیریتی و حفاظتی در سطح حوزه ضروری است. و همچنین مشخص شد که نتایج روش MPSIAC نسبت به روش EPM به مشاهدات واقعی در حوضه نزدیک‌تر می‌باشد.

مقدمه

محاسبه میزان فرسایش در یک حوضه آبریز در صورت موجود بودن آمار کافی از دبی و رسوب با به کارگیری روش‌های آماری امکان‌پذیر می‌باشد ولی نبود یا کمبود داده‌ها در زمینه فرسایش خاک و تولید رسوب در بسیاری از حوضه‌های کشور کاربرد روش‌های تجربی را برای برآورد فرسایش خاک الزامی می‌کند. برای مطالعات روی شدت فرسایش یک منطقه روش‌های زیادی مطرح هستند ولی انتخاب روش اصولی و کارآمد در جهت انجام محاسبات دقیق اهمیت زیادی دارد (Hejazi, Ahmadi & Shahabi, 2018). امروزه تلاش‌های قابل توجهی در جهت توسعه مدل‌های فرسایش صورت گرفته تا پیامدهای ناشی از این فرایند را کاهش دهند (Mezbani, Rezaei Moghadam & Hejazi, 2021). بنابراین شناخت عوامل موثر در فرسایش نیازمند بررسی و مطالعات کاربردی است تا مدل مناسب با توجه به شرایط حوضه انتخاب شود (Shirzadi, 2009). مقادیر خروجی رسوب از حوضه آبریز به ویژگی‌های زیادی بستگی دارد از جمله می‌توان به نوع خاک، شرایط اقلیمی، طبیعی، فیزیوگرافی حوضه و کاربری اراضی اشاره نمود که در این میان کاربری اراضی بیشترین سهم را در این زمینه دارد (Talebi Khiavi, Zabihi & Mostafazadeh, 2017). از طرفی نوع کاربری اراضی به طور مستقیم با فعالیت انسان در ارتباط است به گونه ای که بسته به نوع استفاده‌ای که از زمین انجام می‌گیرد در تضعیف و تشدید مقاومت خاک نقش موثری دارد (Sadeghi, Mostafazadeh & Sadoddin, 2015). مدل‌های متعددی که جهت محاسبه فرسایش و رسوب به کار می‌رود هر کدام معایب و مزایایی دارند و بکارگیری همزمان چند مدل صحت و دقت محاسبات را بالا می‌برد (Guzmán, Barrón & Gómez, 2010). در بیشتر پژوهش‌های انجام شده به دلیل پیچیدگی فرایند فرسایش و کمبود آمار و ایستگاه‌های اندازه‌گیری برای سهولت در کار از روش تجربی استفاده می‌گردد (Rastgoo, Ghahraman, Sanei Nejad, Davary & Khodashenasi, 2006). جهت کاهش اثرات جبران‌ناپذیر فرسایش خاک و اجرای پروژه‌های حفاظتی از خاک نخستین گام مطالعات اساسی و بنیادی روی شرایط فیزیکی حوضه و نوع خاک و شرایط اقلیمی و واکنش رواناب و الگوی پراکنش کاربری اراضی می‌باشد (Asghari Saraskanrood, Mozaffari & Esfandiari, 2022). در مطالعاتی که روی پارامترهای تاثیرگذار در فرایند فرسایش خاک و تولید رسوب انجام می‌گیرد عامل بهره‌برداری از اراضی نقش کلیدی را در این زمینه ایفا می‌کند (Kassas, 1984). لذا تغییرات کاربری و به زیر کشت بردن سطح زیادی از مراتع و جنگل اثرات جبران‌ناپذیری بر بافت، ساختار و مقاومت خاک خواهد داشت به گونه ای که این آثار منفی تا مدت‌ها قابل بازسازی نخواهد بود (Nwaogu, Okeke, Assuah Adu, Babine & Pechanec, 2017). در زمینه فرسایش و رسوب تحقیقات زیادی صورت گرفته و روش‌های زیادی مطرح هستند (Miguel et al., 2011). ولی روش فرسایشی EPM با هدف بررسی شدت فرسایش خاک و اندازه‌گیری رسوب مدلی کارآمد در جهت شناسایی نقاط فرسایش‌پذیر است تا بتوان طرح‌های حفاظتی و آبخیزداری را در منطقه اجرا نمود (Ghazawi, Wali, 2012). اخیراً پژوهشگران زیادی در دنیا با بهره‌گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تصاویری ماهواره‌ای و با کمک مدل‌های فرسایشی اقدام به برآورد فرسایش و رسوب می‌کنند تا بتوانند مناطق حساس و ضعیف در مقابل فرسایش را شناسایی و کنترل کنند (Nayyeri, Salari & Chardawli, 2021). شناخت نوع فرسایش و علت و مکانیسم به وجود آمدن آن کمک بزرگی به مهار فرسایش و مبارزه با آن می‌کند (Grauso, Fattoruso, Crocetti & Montanari, 2007). همانطور که اشاره شد روش‌های

متنوعی در جهت محاسبه کمی فرسایش وجود دارد. در این میان اگر برای برآورد فرسایش و رسوب یک حوضه چند مدل باهم مورد مقایسه قرار گیرد صحت و دقت نتایج بیشتر نمایان می‌شود و مدلی که با طبیعت همخوانی بالای دارد شناسایی می‌گردد (Sadogh, Hosseinzadeh & Azadi, 2015). امروزه بهره‌گیری از ابزار سنجش از دور و GIS در قالب مدل‌های تجربی برای محاسبه میزان فرسایش و رسوب بیشتر شده تا محاسبات کمی بصورت نقشه‌های رقومی قابل فهم‌تر شود (Hashemi & Arab Khedri, 2008). بر همین اساس مطالعات روی فرسایش خاک که یکی از مشکلات عمده محیطی به شمار می‌آید نسبت به گذشته کاملتر و دقیقتر شده است (Rahman, Shi & Chongfa, 2009).

فرسایش خاک تهدیدی جدی برای محیط‌زیست و منابع طبیعی و کشاورزی تلقی می‌شود. بر این اساس نیازمند مطالعات گسترده‌ای در این زمینه است تا اقدامات لازم جهت کنترل آن صورت گیرد ولی اجرای طرح‌های مدیریتی و عملیات‌های حفاظتی، بدون اطلاعات زمانی و مکانی امکانپذیر نخواهد بود (Prasannakumar, Vijith, Abinod & Geetha, 2012). پیامدهای که فرسایش بر منطقه می‌گذارد قابل جبران نیست، چون حجم زیادی از خاک مرغوب و مفید از بین می‌رود در حالی که برای تولید یک سانتیمتر خاک مدتی طولانی بالغ بر ۵۰۰ سال زمان نیاز است. بنابراین مهار و کنترل فرسایش از اهمیت زیادی برخوردار است با طرح‌های پیش بینی شده و مدیریت صحیح می‌توان خسارات ناشی از فرسایش خاک را به حداقل ممکن رساند (Morgan & Nearing, 2011). با وجود اینکه مطالعات داخلی و خارجی زیادی روی روش‌های برآورد فرسایش و رسوب انجام گرفته و با توجه به مسائل فوق و مقبولیت وصحت نتایج دو مدل تجربی EMP و MPSIAC در این پژوهش نیز به برآورد فرسایش و رسوب حوضه زمكان پرداخته شد، تا علاوه بر محاسبه کمی فرسایش خاک و تولید رسوب نقاط آسیب‌پذیر شناسایی و اقدامات مدیریتی و حفاظتی انجام گردد.

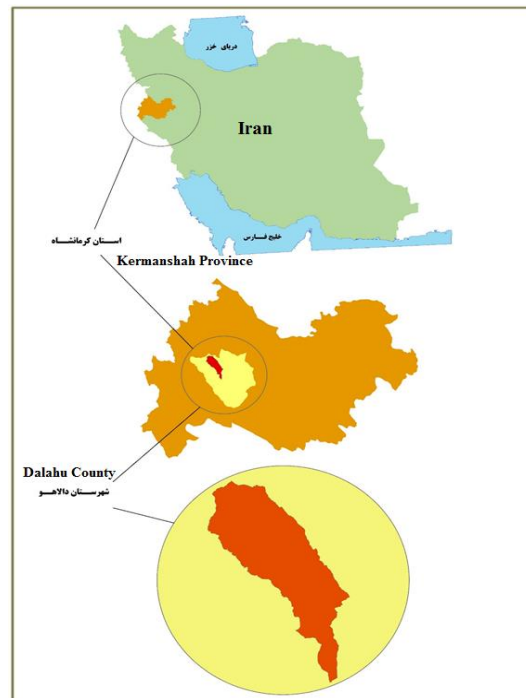
مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی حوضه رود زمكان

حوضه رود زمكان یا زمكان در شمال شهرستان دالاهو و غرب استان کرمانشاه قرار گرفته است، زهکشی این حوضه به شکل مستطیلی به مساحت ۲۳۲۴ کیلومترمربع از سمت جنوب شرق به سمت شمالغرب جریان پیدا می‌کند (شکل ۱ و ۲). محیط آن برابر با ۳۱۲ کیلومتر می‌باشد. این حوضه از غرب به حوضه پیران و از شمال به حوضه‌های پشت تنگ و حوضه رودخانه لیما محدود می‌شود. حوضه در مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه ۴ دقیقه ۳۰ ثانیه تا ۴۶ درجه ۱۱ دقیقه ۸ ثانیه طول شرقی و ۳۴ درجه ۳۵ دقیقه ۴۴ ثانیه تا ۳۴ درجه ۲۲ دقیقه ۵۶ ثانیه عرض شمالی واقع شده است. از جمله مناطق مسکونی در محدوده حوضه ۱۴۹ روستا است که جمعیتی حدود ۳۹۹۷۲ نفر را شامل می‌شود. از جمله روستاهای که بیشترین تمرکز جمعیت را در خود جای داده، می‌توان به روستاهای قوشچی باشی، آسیاب تنوره، ده کهنه، سید باقر و مزرعه رضا علی اشاره کرد. بیشتر فعالیت مردم بومی منطقه روی دامداری، باغداری و کشاورزی دیم و آبی است که به کشت محصولات مانند گندم، ذرت و حبوبات مشغولند.

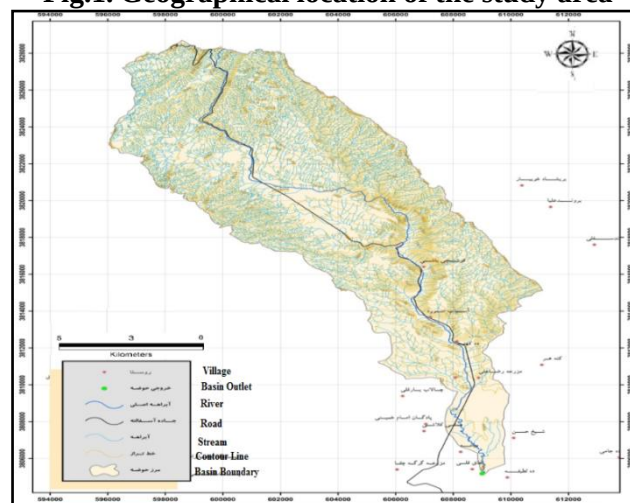
از لحاظ شرایط اقلیمی، حوزه آبریز زمكان در منطقه نیمه مرطوب و معتدل واقع شده است و منشأ عمده بارندگی در نواحی مرتفع و کوهستانی می‌باشد. میانگین بارش سالانه برابر ۴۵۰ میلیمتر و متوسط دمای ماهانه،

بین ۲۸/۲ درجه سانتیگراد در تابستان و تا ۱/۸ درجه سانتیگراد در زمستان در نوسان است. بنابراین میانگین دمای سالانه ۱۶/۲ درجه سانتیگراد می‌باشد. ولی در مرداد ماه دمای هوا تا مرز ۴۲ درجه سانتیگراد بالا و در بهمن ماه تا مرز ۱۳- درجه سانتیگراد افت می‌کند. و میانگین ارتفاع حوضه از سطح آبهای آزاد ۱۵۴۴ متر است. رودخانه‌های اصلی منطقه زمکان نام دارد که با طول ۱۲۵ کیلومتر کل مساحت حوضه را زهکشی می‌کند و به روخانه سیروان در عراق ختم می‌شود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig.1. Geographical location of the study area



شکل ۲- نقشه پایه منطقه مورد مطالعه

Fig.2. Drainage network map of the study area

روش‌های انجام پژوهش

انتخاب مدل مناسب با در نظر گرفتن ویژگی‌های هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی حوضه، مستلزم ارزیابی دقیق و کاربردی مدل‌های مختلف از طریق مقایسه نتایج آنها با مشاهدات واقعی در یک حوضه آبریز می‌باشد. در این خصوص در پژوهش حاضر از میان مدل‌های موجود، به ارزیابی دو روش MPSIAC و EPM که در سطح جهان و کشور از مقبولیت بیشتری برخوردارند پرداخته شده و مقادیر به دست آمده با استفاده از دو روش مورد مقایسه قرار گرفت و مدلی که نتایجش به مشاهدات واقعی نزدیکتر بود معرفی گردید، و در ادامه اقدام به تهیه نقشه‌های پایه مورد نیاز گردید این نقشه‌ها شامل نقشه کاربری اراضی، پوشش گیاهی، جهت شیب، توپوگرافی، جریانات هیدرولوژیکی حوضه، بافت و عمق خاک می‌باشد.

مدل EPM

در سال ۱۹۸۸ در کنفرانس بین المللی رژیم رودخانه توسط گاوریلویچ (Gavrilovic, 1988)، جهت تخمین میزان فرسایش و رسوبدهی ارائه گردید و پس از ۴۰ سال تحقیق روی پلاتهای فرسایشی در کشور یوگسلاوی به کار گرفته شد. این مدل با ۴ مشخصه اصلی نتایج مفید و قابل قبولی از میزان فرسایش را برآورد می‌کند جدول (۱). عوامل این مدل در واحدهای مختلف اراضی یا در شبکه‌های ایجاد شده در نقشه‌های با فرمت رستر و با پیکسل‌هایی در ابعاد ۲۴×۲۴ متری مورد بررسی قرار گرفته است (Rasouli, 2007).

جدول ۱- عوامل روش EPM و نحوه امتیازدهی آنها

Table1- EPM Method Factors and How They Are Scored

شماره	اجزای مدل	علامت	نحوه تعیین امتیاز محاسبه
Num.	Model components	Sym.	Determine the calculation score
1	فرسایش Erosion	ψ	مشاهدات صحرایی و تفسیر عکس هوایی Field observations and aerial photo interpretation
2	حساسی سنگ و خاک Sensitivity of rock and soil	Y	مشاهدات صحرایی و نقشه سنگ شناسی Field observations and lithological mapping
3	استفاده از زمین Landuse	Xa	مشاهدات صحرایی و نقشه کاربری اراضی Field observations and landuse mapping
4	شیب Slope	I	شیب متوسط در هر واحد مطالعاتی Average slope per study unit
5	شدت فرسایش Erosion intensity	Z	$Z=Y.Xa(\psi + I^{0.5})$
6	بارندگی Rainfall	H	بارندگی متوسط سالیانه (mm) Average annual rainfall (mm)
7	دما Temperature	T	$t = \text{Average annual temperature}$ $T = ((t/10 + 0.1)^{0.5})$

۱. فرسایش حوضه آبریز (ψ): فرسایش حوضه آبریز تحت تاثیر عواملی مانند شیب، پوشش گیاهی، خاک، سنگ رخنمون و کاربری اراضی قرار دارد. مقادیر این پارامتر در حوضه مورد مطالعه از تحلیل لایه‌های فوق در نرم‌فزار ARC/GIS محاسبه می‌شود.

۲. ضریب استفاده از زمین (X_a): مقادیر این پارامتر بعد از تهیه نقشه پوشش گیاهی که بر مبنای تصاویر ماهواره‌ای ایجاد شده است به دست می‌آید. نقشه پوشش گیاهی با استانداردهای مدل EPM محاسبه و ضریب کاربری اراضی در آن اعمال شد (Gavrilovic, 1988).
۳. حساسیت خاک و سنگ به فرسایش (Y): این پارامتر از ترکیب دو لایه زمین‌شناسی و خاک‌شناسی در محیط ARC/GIS محاسبه شد. و مقدار این پارامتر با توجه به رخنمون‌های سنگی در حوضه مورد مطالعه و نمونه‌های خاک، تقسیم بندی گردید.
۴. شیب متوسط حوضه (I): در این پژوهش جهت استخراج پارامتر شیب، ابتدا نقشه توپوگرافی رقومی شده با کمک روش درون یابی IDW در محیط GIS به نقشه مدل رقومی ارتفاعی DEM تبدیل شدند و در ادامه نقشه با دستور SLOPE در محیط نرم افزاری، نقشه درصد متوسط شیب استخراج گردید.
- باتوجه به چهار فاکتور محاسبه شده در مرحله قبل (شرایط فرسایش حوضه آبریز، کاربری اراضی، حساسیت خاک و سنگ، شیب متوسط حوضه) مقدار Z یا ضریب شدت فرسایش برای هریک از اجزای واحد اراضی با توجه به رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$Z = Y \cdot X_a (J + I^{0.5}) \quad (1)$$

با قرار دادن مقدار Z در جدول استاندارد که براساس ضریب شدت فرسایش (Z) تنظیم شده است، کلاس فرسایش برای هر واحد حوضه تعیین می‌گردد. و نقشه فرسایش حوضه در محیط ARC/GIS ترسیم شد. در روش EPM برای تخمین متوسط سالانه رسوب ویژه در حوضه آبریز از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

$$W_{SP} = T \cdot H \cdot \pi \cdot Z \quad (2)$$

W_{SP} : برحسب متر مکعب در کیلومتر مربع در سال

H : ارتفاع متوسط بارندگی سالانه در حوضه آبریز بر حسب میلیمتر

T : ضریب درجه حرارت با استفاده از رابطه $T = (t/10 + 0.1)^{0.5}$

t میانگین درجه حرارت سالانه در حوضه آبریز به درجه سانتیگراد است. برای این منظور جهت تعیین متوسط سالانه تولید رسوب ویژه برای هر یک از واحدهای هیدرولوژیکی محاسبه شد، و سپس مقدار رسوب سالانه حوضه مورد مطالعه با استفاده از رابطه (۳) تعیین گردید.

$$V_P = F \times W_{SP} \quad (3)$$

که در آن V_P رسوب حوضه برحسب متر مکعب در سال و F مساحت حوضه بر حسب کیلومتر مربع می‌باشد.

مدل MPSIAC

روش PSIAC در سال ۱۹۶۸ توسط کمیته مدیریت آب در آمریکا برای محاسبات شدت فرسایش خاک و تولید رسوب مناطق خشک و نیمه خشک ارائه شد. این روش در سال ۱۹۸۲ اصلاح شد (Refahi, 2016). در ایران، این مدل در سال ۱۳۵۲ برای نخستین بار در حوزه آبخیز سد دز به اجرا درآمد. که ۹ عامل را برای محاسبه فرسایش و تولید رسوب ارزیابی می‌کند. هر یک از این عوامل، از دیدگاه کمی و کیفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند به طوریکه از نظر کیفی دارای پنج درجه و از لحاظ کمی از ۱۰- تا ۲۵+ امتیازبندی شده‌اند.

۱. زمین شناسی سطحی منطقه (Y_1): شناخت ویژگی‌های زمین‌شناسی حوضه برای ارزیابی فرسایش و رسوب‌زایی دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. سنگ‌های سست و نرم معمولاً به سادگی فرسوده شده و نقش مهمی

را در تولید رسوب برعهده دارند. این عامل را با Y_1 نشان می‌دهند. امتیاز آن ۱۰ - ۰ در نظر گرفته شده است (جدول ۳). در این روش، امتیاز عامل زمین‌شناسی سطحی از رابطه ۴ حاصل می‌شود:

$$Y_1 = X_1 \quad (4)$$

که در آن X_1 امتیاز عامل زمین‌شناسی و Y_1 شاخص فرسایش زمین‌شناسی سطحی است که براساس نوع سنگ، سختی، شکستگی و هوازدگی تعیین می‌شود.

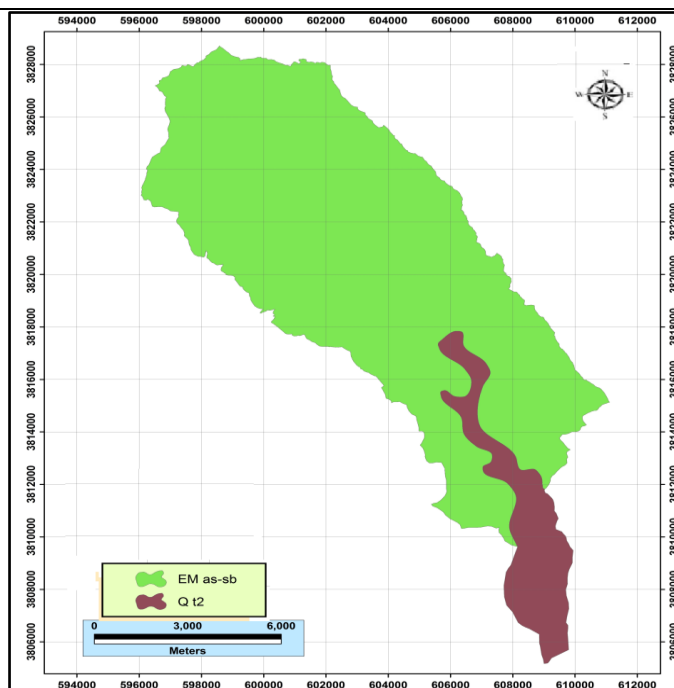
برای تعیین مقدار عامل زمین‌شناسی سطحی، در هر یک از واحدهای هیدرولوژیک، مساحت هر گروه فرسایش مشخص و متوسط مقدار عامل زمین‌شناسی به صورت میانگین وزنی محاسبه گردید.

لازم به ذکر است که واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه شامل سازندهای آسماری-شهبازان و پادگانه‌های آبرفتی می‌باشد (شکل ۳) و بیشتر قسمت‌های مختلف حوضه مورد بررسی عمدتاً در برگیرنده رسوبات دوران چهارم است (جدول ۲).

جدول ۲- رده‌های کیفی فرسایش‌پذیری در واحدهای سنگ شناسی

Table 2- Qualitative categories of erodibility in lithological units

توصیف کیفی Qualitative description	متوسط وزنی امتیاز Weighted average score	امتیاز Score	سنگ شناسی Lithology	نماد Symbol	سازند Formation
فرسایش کم (سنگ های مقاوم) Low erosion	4	4	Limestone سنگ آهک	EMas-sb	آسماری-شهبازان Asmari-Shahbazan
فرسایش زیاد (سنگ های فرسایش پذیر) High erosion	8	8	Dolomite دولومیت		
			(آبرفت) Alluvium	Qt2	واحد Qt2



شکل ۳- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

Fig.3. Geological map of the study area

۲. خاک‌شناسی (Y2): در این بررسی ضریب فرساینده‌گی خاک (K) برای محاسبه فاکتور خاک‌شناسی (Y2) خاک از رابطه ۵ در جدول (۳) استفاده شده است.
۳. آب وهوا (Y3): عامل آب و هوا از روی شدت بارش با مدت دوام شش ساعته (در دوره بازگشت دو ساله) در ایستگاه‌های باران سنجی حوضه مورد مطالعه برآورد شده است. مقادیر این پارمتر با استفاده از رابطه ۶ که در جدول (۳) اشاره شده به دست می‌آید.
۴. رواناب (Y4): در روش MPSIAC برای برآورد امتیاز عامل رواناب از رابطه ۷ در جدول (۳) استفاده می‌شود. لازم به ذکر است، برای مطالعه آبدهی بر اساس تناوب دوره‌های خشک و مرطوب، دوره‌های سیلاب منطقه را بررسی و مقادیر دبی حداکثر لحظه‌ای و رواناب برای حوضه تعیین می‌گردد (شکل ۷).
۵. توپوگرافی (Y5): در این پژوهش جهت استخراج پارامتر شیب، ابتدا نقشه توپوگرافی رقومی شده ترسیم، سپس در بانک داده‌ها قرار می‌گیرد. در ادامه این خطوط با استفاده از روش درونیابی در محیط GIS به نقشه مدل رقومی ارتفاعی DEM تبدیل شد. و نقشه خروجی را با دستور SLOPE در محیط نرم افزار بصورت نقشه متوسط شیب استخراج گردید (شکل ۶). مقادیر این پارمتر با استفاده از رابطه ۸ که در جدول (۳) اشاره شده به دست می‌آید.
۶. پوشش گیاهی (Y6): در روش MPSIC درصد تاج پوشش گیاهی و نقش آن روی فرسایش منطقه مورد محاسبه قرار می‌گردد (شکل ۴). در مطالعات سنجش از دور جهت استخراج درصد تاج پوشش گیاهی از تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شود. جهت استخراج درصد پوشش گیاهی، شاخص NDVI به دلیل این که همبستگی بالایی با تاج پوشش گیاهی دارد. انتخاب شده است. مقادیر این پارمتر با استفاده از رابطه ۹ که در جدول (۳) اشاره شده به دست می‌آید.
۷. کاربری اراضی (Y7): استفاده از زمین و نوع کاربری اراضی مقاومت خاک را در مقابل انواع فرسایش آبی و بادی تحت الشعاع قرار می‌دهد (شکل ۵). و عدم مدیریت صحیح در کاربری زمین روند تضعیف خاک را تشدید می‌کند. برای تعیین امتیاز این پارمتر از رابطه ۱۰ در جدول (۳) استفاده می‌شود.
۸. وضعیت فعلی فرسایش در سطح حوضه (Y8): در روش MPSIC برای تعیین امتیاز عامل وضعیت فعلی فرسایش، از رابطه ۱۱ در جدول (۳) استفاده می‌شود. تعیین این عامل در حوضه با کمک اطلاعات مربوط به داده‌های صحرایی و با توجه به نوع فرسایش در سطح حوضه آبریز به دست می‌آید.
۹. فرسایش آبراهه‌ای (رودخانه‌ای) و انتقال رسوب (Y9): برای تعیین امتیاز این عامل از رابطه ۱۲ در جدول (۳) استفاده شده است.

محاسبه درجه فرسایش و رسوبدهی در روش MPSIAC

پس از تعیین مجموع امتیازات عوامل ۹ گانه، جهت برآورد میزان فرسایش و رسوب سالانه حوضه از رابطه ۱۳ استفاده گردید (Moghimi & Mahmoodi, 2005).

$$Q_s = 3877e^{0.0353R} \quad (13)$$

Q_s : میزان رسوبدهی سالانه بر حسب متر مکعب در کیلومتر، این ضریب، معیار محاسبه رسوب ویژه و رسوب سالانه قرار گرفته است.

R : درجه رسوبدهی یعنی مجموع امتیازات عوامل ۹ گاه

e : عدد نپر برابر ۲/۷۸

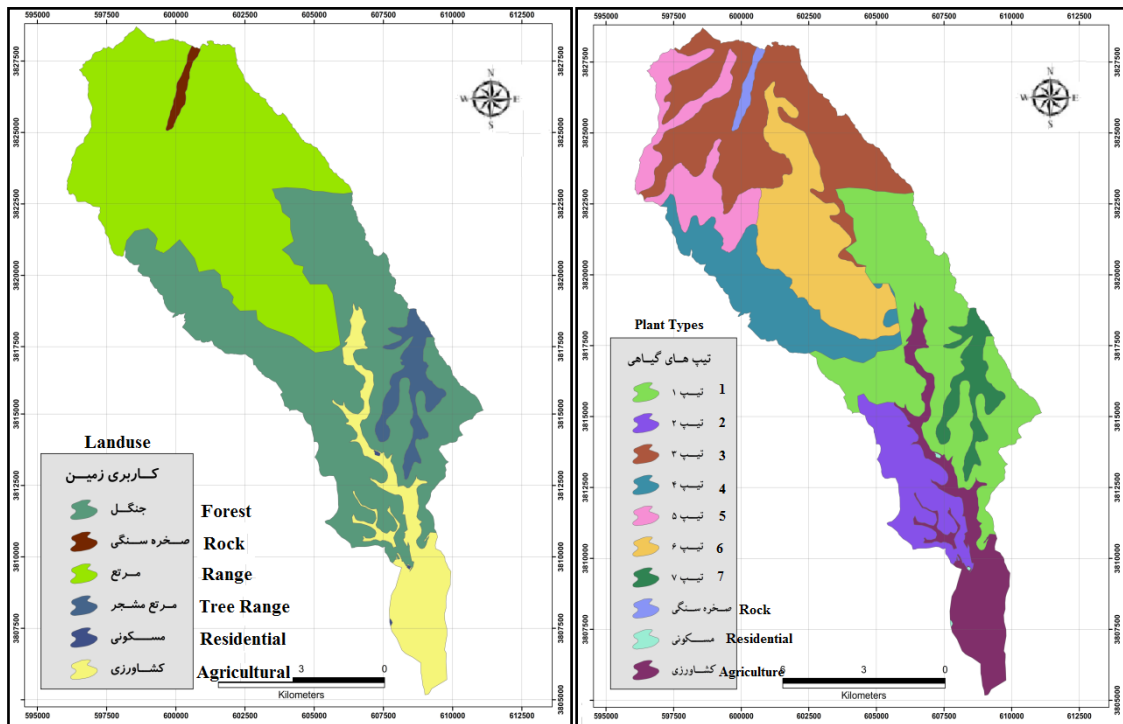
جدول ۳- عوامل مؤثر در فرسایش خاک و تولید رسوب با امتیازات و روابط مربوطه در مدل MPSIAC
Table 3- Factors affecting soil erosion and sediment production with corresponding scores and relationships in the MPSIAC model (Esmali Ouri & Abdollahi, 2010)

ردیف	عوامل مؤثر در فرسایش و تولید رسوب	شرح پارامترها	نحوه محاسبه امتیاز در روش MPSIAC
1	زمین شناسی Geology	X_1 : امتیاز حساسیت سنگ به فرسایش (۰-۱۰)	رابطه ۴ (4) $Y_1 = X_1$
2	خاک Soil	K : عامل فرسایش پذیری خاک در معادله جهانی	رابطه ۵ (5) $Y_2 = 16.67k$
3	آب و هوا Climate	X_3 : بارندگی ۶ ساعته با دوره بازگشت دو ساله	رابطه ۶ (6) $Y_3 = 0.2 X_3$
4	روان آب Runoff	R : ارتفاع روان آب سالانه (mm) و Qp دبی ویژه سالانه (mm ³ /s.km ²)	رابطه ۷ (7) $Y_4 = 0.006 R + 10 QP$
5	پستی و بلندی Topography	S : درصد شیب	رابطه ۸ (8) $Y_5 = 0.33 S$
6	پوشش گیاهی Vegetation	P_b : درصد اراضی لخت	رابطه ۹ (9) $Y_6 = 0.2 P_b$
7	کاربری اراضی Landuse	P_e : درصد تاج پوشش گیاهی	رابطه ۱۰ (10) $Y_7 = 20 - 0.2 P_e$
8	وضعیت فعلی فرسایش Current status of erosion	SSF : امتیاز عامل سطحی خاک در مدل B.L.M	رابطه ۱۱ (11) $Y_8 = 0.25 SSF$
9	فرسایش رودخانه ای River Erosion	$SS.F.G$: امتیاز فرسایش خندقی در مدل B.L.M	رابطه ۱۲ (12) $Y_9 = 1.67 SS.F.G$

جدول ۴- کلاس بندی فرسایش و رسوب با روش MPSIAC

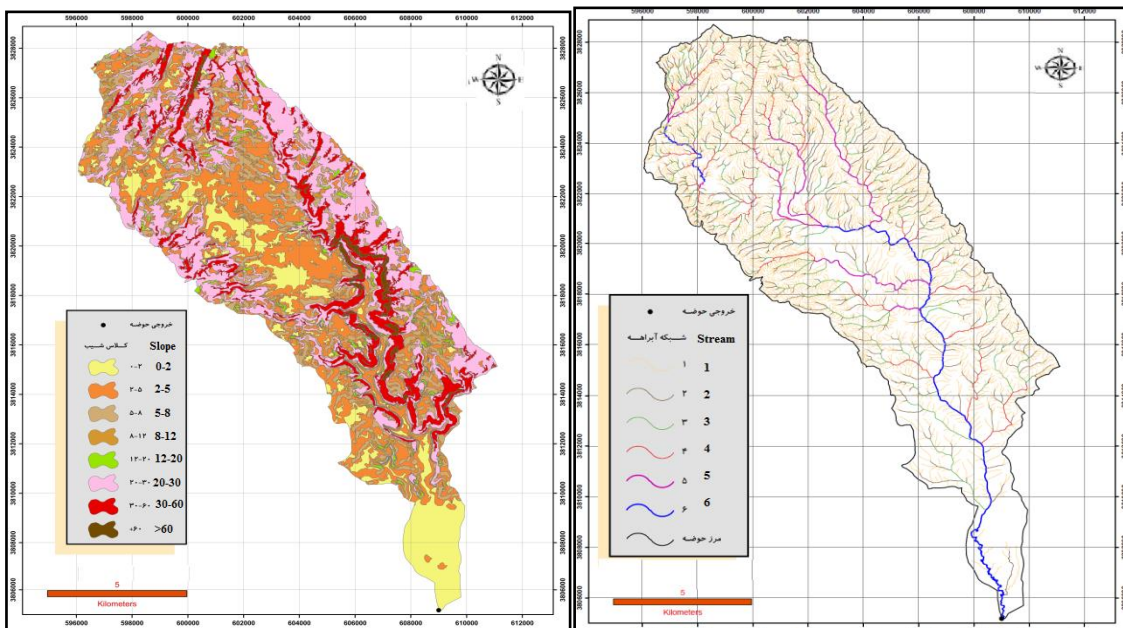
Table 4- Erosion and sediment classification using the MPSIAC method

نمرات نشان دهنده شدت فرسایش پذیری Scores indicating the severity of erosion	تولید رسوب سالانه Annual sediment production M ³ /km ²	رده کیفی فرسایش پذیری Erodibility quality category	کلاس رسوبدهی و فرسایش Sedimentation and erosion class
$8 < X \leq 10$	> 1012	Very High خیلی زیاد	V
$6 < X \leq 8$	520 - 1012	High زیاد	IV
$4 < X \leq 6$	196 - 520	Mdium متوسط	III
$2 < X \leq 4$	95 - 196	Low کم	II
$0 < X \leq 2$	< 95	Very low خیلی کم	I



شکل ۵- نقشه پوشش گیاهی
Fig.5. Vegetation map

شکل ۴- نقشه کاربری اراضی
Fig.4. Land use map



شکل ۷- نقشه شیب
Fig.7. Slope map

شکل ۶- نقشه شبکه آبراهه
Fig.6. Drainage Network map

جدول ۵- میانگین امتیاز اجزای مدل های EPM و MPSIAC در کل حوضه

Table 5- Average score of EPM and MPSIAC model components in the basin

MPSIAC		EPM		مدل Model
میانگین امتیاز Average score	اجزای مدل Model components	میانگین امتیاز Average score	اجزای مدل Model components	ردیف Row
9.10	سنگ شناسی Lithology	0.58	شرایط فرسایش erosion conditions	1
10.14	خاک Soil	0.1	ضریب حساسیت سنگ و خاک Rock and soil sensitivity coefficient	2
10.12	اب و هوا Climate	0.47	ضریب استفاده از زمین Land use coefficient	3
13.02	رواناب Runoff	0.16	شیب Slope	4
23.16	پستی بلندی Topography	0.55	ضریب شدت فرسایش Erosion intensity coefficient	5
12.34	پوشش سطح زمین Land surface cover	362.7	بارندگی Rainfall	6
17.38	استفاده از زمین Landuse	16.3	دما Temperature	7
19.67	وضعیت فعلی فرسایش در سطح حوضه Current status of erosion at the basin level	-	-	8
33.32	فرسایش رودخانه River erosion	-	-	9

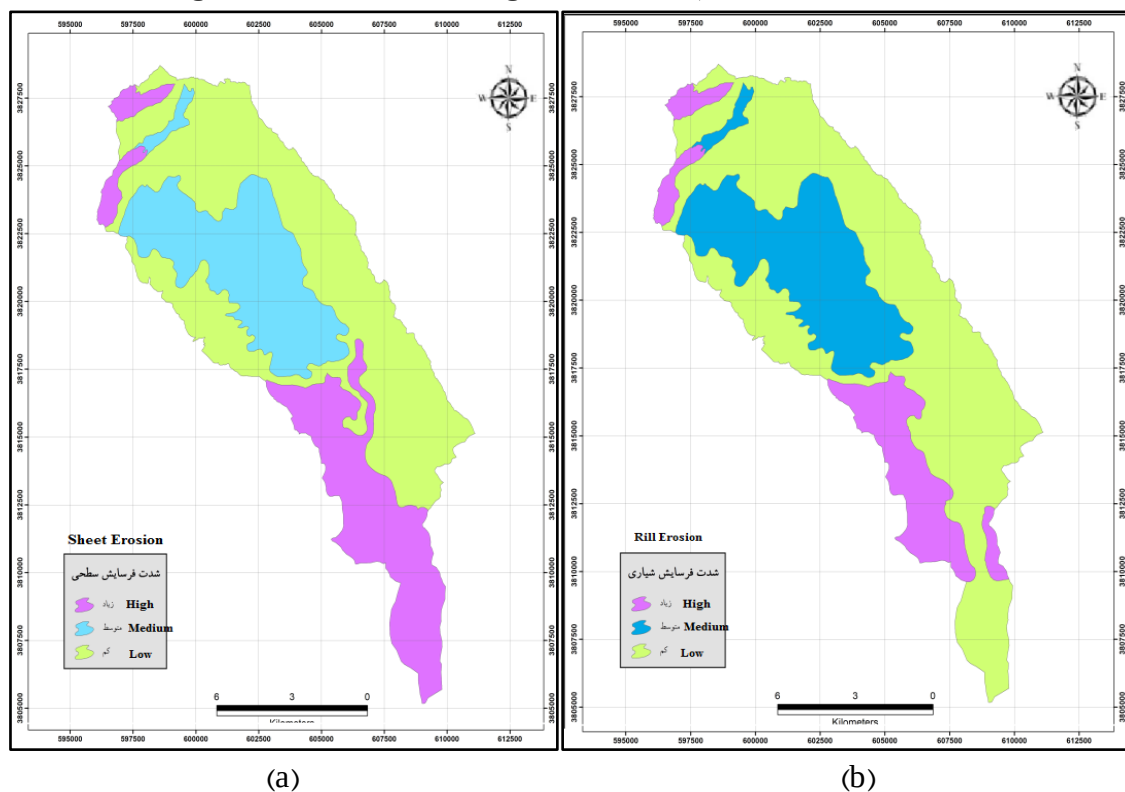
نتایج و بحث

فرسایش خاک در کشورهای در حال توسعه روندی افزایشی دارد. تشدید فرسایش باعث از بین رفتن خاک در بخش کشاورزی، کاهش ظرفیت تولیدی خاک و آلودگی آب های سطحی در اثر رسوب گذاری می شود. اندازه گیری مقادیر دقیق فرسایش و رسوب به دلایل اقتصادی، فنی، حفاظتی در تمامی نقاط امکان پذیر نیست. از این رو مناسب ترین راهکار، پیش بینی یا محاسبه کمی فرسایش و رسوب است. که لازمه ی آن آگاهی از مکانیزم های فرسایش و عوامل مؤثر بر آن است. از طرفی انتخاب مدل مناسب با شرایط منطقه مستلزم ارزیابی دقیق و کاربردی مدل های مختلف از طریق مقایسه نتایج حاصل از بکارگیری آن ها به ضریب رسوبدهی واقعی در یک حوضه آبریز می باشد. براین اساس، در این پژوهش برآورد فرسایش و رسوب حوضه زمکان با استفاده از دو مدل EPM و MPSIAC مورد پردازش قرار گرفت و خروجی این دو مدل مقایسه، و میزان نزدیک بودن خروجی هر کدام از مدل ها به مشاهدات واقعی حوضه مشخص شد (شکل ۸) و در نهایت موثرترین و کاراترین مدل معرفی گردید.

در نتایج برآورد پارامترهای مورد بررسی در مدل EPM مشخص شد که بر اساس عامل حساسیت خاک و سنگ به فرسایش، سنگ های نامقاوم در بخش های پایینی حوضه متمرکزتر هستند. و شدت ضریب فرسایش

در این نواحی بیشتر مشاهده می‌شود و تغییر کاربری زمین موجب شده تا مساحت بیشتری از حوضه تحت تاثیر هدر رفت خاک قرار بگیرد در این بخش ضریب استفاده از زمین بیش از ۰/۴۷ می‌باشد. که ضعیف بودن پوشش گیاهی در این ناحیه را نشان می‌دهد. و مقادیر رسوب محاسبه شده با این روش ۳۶۲۴/۷۲ تن در سال تخمین زده شده است. مقدار Z به دست آمده برای این حوضه بیش از ۱ است که نشان دهنده فرسایش پذیری شدید این حوضه می‌باشد.

نتایج بررسی مدل MPSIC و تلفیق و تحلیل ۹ پارامتر این روش، مشخص شد که این مدل همانند مدل EPM نشان می‌دهد که تقریباً بیش از ۶۰ درصد حوضه آبریز در طبقه فرسایش پذیر و تولید رسوب قرار دارد. با مقایسه نتایج این پژوهش و مطالعات پیشین، مشخص شد که روش MPSIC نتایج دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت را نسبت به مدل EPM به دست می‌آورد (شکل ۸). دلیل واضح این موضوع این است که روش MPSIC پارامترهای بیشتری را در بر می‌گیرد و فاکتورهای بیشتری را در محاسبه فرسایش دخالت می‌دهد. برای اساس برای مطالعات تفصیلی استفاده بهتری دارد. ولی می‌توان گفت مدل EPM در مطالعات اجمالی فرسایش خاک موفقیت آمیزتر عمل می‌کند. و از آنجاییکه به آمار خاصی نیز نیاز ندارد برای حوضه‌های بدون آمار براحتی قابل اجراست. همچنین با استفاده از قابلیت نرم‌افزار Arc/GIS به خوبی می‌توان میزان همخوانی و توافق بین طبقات وضعیت فرسایش حاصله از دو مدل را با هم مقایسه نمود. نتایج این مقایسه در جدول (۶) درج شده است.



شکل ۸- نقشه شدت فرسایش حوضه زیمکان با مقایسه دوروش EPM (a) و MPSIAC (b)
Fig.8. Erosion intensity map of the Zimkan basin comparing EPM (a) and MPSIAC (b)

جدول ۶- مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده با دو مدل MPSIAC و EPM

Table 6- Comparison of observed and estimated values with the two models MPSIAC and EPM

رسوب کل Total Sediment (ton/ha/year)	رسوب ویژه Specific Sediment (ton/ha/year)	فرسایش کل Total Erosion (ton /year)	فرسایش ویژه Specific Erosion (ton/ha/year)	فاکتور/ واحد Factor/Unit
2461.63	2.32	5142.9	2.81	MPSIAC
3624.72	2.74	6401.2	3.68	EPM
2559.11	2.38	5261.9	3.11	مقدار مشاهده‌ای Observed value

نتیجه‌گیری

یکی از مسائل جدی در بحث مدیریتی حوضه‌های آبریز در سطح ملی و جهانی فرسایش است که پیامدهای آن به صورت مستقیم در کاهش حاصلخیزی و هدر رفت خاک و پرشدن مخازن سد و کاهش کیفیت آب و به صورت غیر مستقیم در کاهش روند چرخه توسعه کشور می‌توان دید. لازمه برنامه‌ریزی و اتخاذ تصمیمات اصولی جهت مهار و کنترل فرسایش، آگاهی از میزان فرسایش در یک حوضه آبریز و شناسایی نقاط بحرانی و اولویت‌بندی آنها جهت اجرای عملیات‌های حفاظتی و اقدامات مدیریتی در سطح حوضه الزامی است. در این پژوهش هدف ارزیابی خطر فرسایش خاک و همچنین پهنه‌بندی مناطق حساس به فرسایش در حوضه آبریز زیمکان با استفاده از دو مدل EPM و MPSIAC در چارچوب سیستم اطلاعات جغرافیایی (Arc GIS) و با کمک فناوری سنجش از دور انجام گردید. در گام نخست هریک از فاکتورهای مدل‌های مورد بحث جهت برآورد مقادیر فرسایش در محیط Arc/GIS مورد تحلیل و محاسبه قرار گرفت. و توزیع مکانی فرسایش در بخش‌های مختلف حوضه به دست آمد. در نتایج حاصله مشخص شد که در هر دو روش EPM و MPSIAC، بیشترین میزان فرسایش در بخش‌های پایین دست جنوب و جنوبغرب حوضه و کمترین مقادیر فرسایش مربوط به بخش‌های شمال شرق حوضه می‌باشد. میزان فرسایش ویژه و کل در حوضه مورد مطالعه با استفاده از دو مدل MPSIAC و EPM به ترتیب ۲/۸۱، ۳/۶۸ تن در هکتار در سال و ۵۱۴۲/۹، ۶۴۰۱/۲ تن در سال برآورد گردید. در گام بعدی با تلفیق لایه‌های مدل فرسایشی حوضه مورد مطالعه از لحاظ فرسایش پذیری به سه رده فرسایشی کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شد. با وجود شرایط اقلیمی مساعد در منطقه و پوشش مناسب جنگل و مرتع حوضه تا حدودی خاک در مقابل ریزش‌های جوی شدید محافظت شده است. ولی اقدامات انسان و تغییر کاربری و به زیر کشت بردن مراتع ضعیف جهت کشت دیم و تمرکز مناطق مسکونی در بخش‌های پایین دست حوضه، مقادیر فرسایش و هدر رفت خاک را در این نواحی بیشتر از نقاط دیگر بالا برده است. در تحلیل‌های انجام شده روی دو مدل مذکور مشخص شده که تفات ناچیزی بین میزان رسوب محاسبه شده در روش MPSIAC که معادل ۲۴۶۱/۶۳ تن در هکتار در سال می‌باشد. با مقدار رسوب مشاهده‌ای که معادل ۲۵۵۹/۱۱ تن در هکتار در سال است وجود دارد. این در حالی است که این اختلاف در مدل EPM بیشتر مشاهده می‌شود. و همچنین کلاس فرسایش کم بیشترین مساحت حوضه را به خود اختصاص داده است که حدوداً ۵۸ درصد مساحت را دارا می‌باشد و کلاس فرسایش زیاد و متوسط جمعاً مساحتی حدود ۴۲ درصد حوضه را شامل می‌شود. همچنین مقادیر رسوب ویژه و سالانه در دو مدل MPSIAC و EPM به ترتیب برابر با ۲/۳۲، ۲/۷۴ تن در هکتار در سال و ۲۴۶۱/۶۳، ۳۶۲۴/۷۲

تن در سال می‌باشد. که با این وجود وضعیت حوضه را در شرایط شدیدی از لحاظ هدر رفت خاک نشان می‌دهد. لذا شناسایی نقاط بحرانی و ضعیف در مقابل فرسایش از جمله کاربردهای مهم طبقه بندی فرسایش خاک به حساب می‌آید. بر همین اساس مدیریت صحیح در بخش کشاورزی و بالابردن آگاهی مردم بومی منطقه دراستفاده از خاک و انجام عملیات حفاظتی و آبخیزداری در سطح حوضه در اولویت قرار دارد.

References

- Asghari Saraskanrood, S., Mozaffari, H., & Esfandiari, F. (2022). Modeling the Erosion and Sedimentation Rate of Sojasrood River before and after Construction of Golaber Dam with Machine Learning Algorithms. *Environmental Erosion Research Journal*, 12(2), 172-204. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22517812.1401.12.2.12.9>
- Esmali Ouri, A., & Abdollahi, K. (2010). *Watershed management and soil conservation*. Ardabil: Mohaghegh Ardabili Publications. [In Persian]
- Gavrilovic, Z. (1988). Use of an Empirical Method(Erosion Potential Method) for Calculating Sediment Production and Transportation in Unstudied or Torrential Streams. In *International Conference on River Regime. Hydraulics Research Limited, Wallingford, Oxon UK*. 411-422.
- Ghazawi, R., Wali, A. A., Maghami, Y., Abdi, Z., & Sharafi, S. (2012). Comparison of EPM, MPSIAC and PSIAC models in estimating erosion and sedimentation using GIS. *Geography and development*, 10(27), 117-126. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.22111/GDIJ.2012.488>
- Grauso, S., Fattoruso, G., Crocetti, C., & Montanari, A. (2007). A spatially distributed analysis of erosion susceptibility and sediment yield in a river basin by means of geomorphic parameters and regression relationships. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4(2), 627-654. <http://dx.doi.org/10.5194/hessd-4-627-2007>
- Guzmán, G., Barrón, V., & Gómez, J. A. (2010). Evaluation of magnetic iron oxides as sediment tracers in water erosion experiments. *Catena*, 82(2), 126-133. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.05.011>
- Hashemi, S. A. A., & Arab Khedri, M. (2008). Evaluation of EPM Model by Sediment Measurement in Reservoirs of Small Dams. *Journal of Crop Production and Processing*, 11(42), 345-355. [In Persian] <http://dorl.net/dor/20.1001.1.22518517.1386.11.42.28.7>
- Hejazi, A., Ahmadi, A., & Shahabi, H. (2018). Estimates of erosion amount and sediment production in the Kangir watershed in Ilam Province using E.P.M model. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 7(16), 1-22. [In Persian] https://journals.usb.ac.ir/article_3628.html
- Kassas, M. (1984). The global biosphere: Conservation for survival. *World Futures: Journal of General Evolution*, 19(3-4), 209-222. <https://doi.org/10.1080/02604027.1984.9971981>
- Mezbani, M., Rezaei Moghadam, M. H., & Hejazi, A. (2021). Assessment of soil erosion risk in land uses using Revised Universal Soil Loss Equation (Case Study: Sikan Basin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 10(1), 41-63. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoe.2021.67238.0>
- Miguel, P., Samuel-Rosa, A., Dalmolin, R. S. D., PEDRON, F., Bueno, J. M. M., & Balbinot, A. (2011). The USLE model for estimating soil erosion in complex topography areas. *Anais*

- XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, 85, 9227-9230. <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.07.14.41/doc/p1441.pdf>
- Moghim, E., & Mahmoodi, F. (2005). *The research method of Naural Geography*. Tehran: Ghomes. [In Persian]
- Morgan, R. P. C., & Nearing, M. A. (2011). *The future role of information technology in erosion modeling*. Hand Book of Erosion Modeling.
- Nayyeri, H., Salari, M., & Chardawli, Z. (2021). Prioritization of Linear Erosion Using Morphometric and Geomorphological Indicators Case Study: Gheshlagh Watershed, Sanandaj West of Iran. *Hydrogeomorphology*, 8(28), 191-214. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/hyd.2021.47623.1601>
- Nwaogu, C., Okeke, O. J., Assuah Adu, S., Babine, E., & Pechanec, V. (2017). Land use—Land cover change and soil-gully erosion relationships: A study of Nanka, South-Eastern Nigeria using geoinformatics. In *Proceedings of GIS Ostrava*. Cham: Springer International Publishing, 305-319.
- Prasannakumar, V., Vijith, H., Abinod, S., & Geetha, N. J. G. F. (2012). Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. *Geoscience frontiers*, 3(2), 209-215. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.11.003>
- Rahman, M. R., Shi, Z. H., & Chongfa, C. (2009). Soil erosion hazard evaluation—an integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies. *Ecological Modelling*, 220(13-14), 1724-1734. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.04.004>
- Rasouli, A. A. (2007). *An analytic approach to GIS technology*. Tabriz: University of Tabriz. [In Persian]
- Rastgoo, S., Ghahraman, B., Sanei Nejad, H., Davary, K., & Khodashenasi, S. R. (2006). Estimation of Erosion and Sedimentation of Tang-e-Kenesht Basin with Empirical Models of MPSIAC and EPM Using GIS. *Journal of Water and Soil Science*, 10(1), 91-105. [In Persian] <http://dorl.net/dor/20.1001.1.24763594.1385.10.1.7.2>
- Refahi, H. (2016). *Water erosion and its control*. Tehran: University of Tehran. [In Persian]
- Sadeghi, S. H., Mostafazadeh, R., & Sadoddin, A. (2015). Response of Sedimentgraphs and Sediment Rating Loops to Land Use Type and Spatial Pattern. *Watershed Engineering and Management*, 7(1), 15-26. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2015.100900>
- Sadogh, S. H., Hosseinzadeh, M. M., & Azadi, F. (2015). Determining the Erosion in Kahman Drainage Basin Using EPM, BLM and Fargas Models. *Hydrogeomorphology*, 2(2), 137-154. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23833254.1394.2.2.8.7>
- Shirzadi, H. (2009). *Landslide potential on the new road from Sanandaj to Marivan using the AHP model*. Master's thesis, University of Tehran. [In Persian]
- Talebi Khiavi, H., Zabihi, M., & Mostafazadeh, R. (2017). Effects of Land-use Management Scenarios on Soil Erosion Rate using GIS and USLE Model in Yamchi Dam Watershed, Ardabil. *Journal of Water and Soil Science*, 21(2), 221-234. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.21.2.221>



Subsidence Monitoring in Railway Lines With LICSBAS Algorithm and Radar Interferometric Method (Case Study: Mashhad-Sarkhs Railway)

Soroush Yasini^a, Hossein Etemadfard^{b*}

^a Environmental engineering and science Graduate Student, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^b Assistant Professor in GIS, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Article Info

Abstract

Article history

Received:

27 April 2024

Received in revised form:

3 September 2024

Accepted: 3 October 2024

Available online:

21 March 2025

Keywords:

Land subsidence,
InSAR monitoring,
Railway
infrastructure,
Groundwater
depletion,
Agricultural impacts,
Risk assessment

In recent times, the increasing occurrence of subsidence has raised concerns, particularly in Iran's plains, urban regions, and transportation infrastructure. This study focuses on understanding how this phenomenon affects the Mashhad-Sarkhs railway, since it is located on the eastern end of Iran's rail network and serves as a vital rail link connecting to Central Asian nations, which are important trade partners. To assess the rate of subsidence along this route, we processed 151 radar images between 2017 and 2023, utilizing the new NSBAS algorithm and pre-processed data from COMET LiCSAR, to calculate the cumulative rate of land subsidence. Additionally, to reduce atmospheric effects on subsidence rate estimation, GACOS data was used. Following this, we created a land cover map of the study area with four land use classes using the Google Earth Engine to investigate the effects of land cover variations on subsidence. Finally, we generated a subsidence profile around the railroad and combined it with land use classes to visualize the correlation between croplands and subsidence occurrence in affected areas. InSAR results show three land subsidence zones along the rail line, with some areas experiencing subsidence exceeding 200 mm along the satellite line of sight. The results indicate a strong correlation between subsidence along the railway and farming within the rail corridor. Conversely, there were almost no signs of land subsidence outside the plains due to the absence of concentrated agricultural activities. In this study, the first 60 kilometers of the railroad, which contains more than 20 bridges, was identified as the most concerning subsidence zone along the rail line.

*Corresponding author : Dr. Hossein Etemadfard E-mail address: etemadfard@um.ac.ir

How to cite this article: Yasini, S., & Etemadfard, H. (2025). Subsidence Monitoring in Railway Lines With LICSBAS Algorithm and Radar Interferometric Method (Case Study: Mashhad-Sarkhs Railway). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), pp. 227-246. DOI: <https://doi.org/10.22067/geoe.h.2024.87783.1480>



Extended Abstract

Introduction

Land subsidence, an environmental and geological phenomenon, arises from groundwater depletion and soil compaction due to human and natural factors, particularly in arid and semi-arid regions. In Iran, like many developing countries, excessive groundwater extraction to meet growing industrial, urban, and agricultural demands has a long history, exacerbating subsidence in eastern and central plains such as Mashhad, Neyshabur, and Jovin, worsened by recurring droughts. This phenomenon poses significant risks to infrastructure, including high-speed railways, roads, tunnels, and bridges, threatening economic development and safety due to potential human and financial losses. The Mashhad-Sarakhs railway, a critical transit corridor in northeastern Iran connecting to Central Asian networks, underscores the need for subsidence monitoring given its role in transporting goods and people. Radar interferometry (InSAR) offers a cost-effective, weather-independent method to monitor subsidence over large areas, unlike traditional techniques like leveling or GPS, though it faces challenges from topographic, atmospheric, and orbital errors. Advanced InSAR techniques, such as small baseline and permanent scatterer methods, enhance accuracy by reducing noise and improving coherence, while newer algorithms address gaps in data networks, especially in agricultural zones. This study investigates subsidence along the Mashhad-Sarakhs railway using modern InSAR approaches, aiming to identify high-risk zones in this vital infrastructure corridor.

Material and Methods

The Mashhad-Sarakhs railway, approximately 195 km long with about 5 km extending beyond Iran's borders, is located in the northeasternmost part of the country between $59^{\circ}38'$ and $61^{\circ}14'$ east longitude and $36^{\circ}1'$ to $36^{\circ}33'$ north latitude. Operational since 1996, three years after project initiation, this route features three tunnels totaling around 6 km and includes 18 stations, 15 large bridges, and 386 medium to small bridges along its 2,700 m of bridge structures.

This study analyzed pre-processed Sentinel-1 radar imagery spanning January 2017 to 2023, covering a broad spatial area with interferograms and coherence data limited by perpendicular and temporal baselines of 200 meters and 50 days. The dataset was customized to the study region by masking irrelevant areas, and atmospheric effects were corrected using an external dataset to reduce noise that could obscure surface changes. Interferogram quality was assessed, discarding those with coherence below 0.3 due to snow, dense vegetation, or other disruptions, while unwrapping errors were detected and eliminated through a closed-loop phase method, removing interferograms exceeding an RMS threshold of 1.5. Displacement rates were calculated using a small baseline approach, assuming linear subsidence, with a reference point selected for minimal error. The standard deviation of rates was determined via repeated sampling to ensure reliability, and pixels exceeding noise thresholds were filtered out. To investigate the relationship between land cover and subsidence, a 2022 land cover map was generated using Sentinel-2 imagery at 10×10 m resolution with 11 classes via Google Earth Engine, then resampled to 101×101 m using the nearest-neighbor algorithm, and simplified into four classes: agricultural land, buildings, bare land, and grassland. Spatio-temporal filters were applied to minimize residual tropospheric, ionospheric, and orbital errors, yielding a robust time-series displacement dataset.

Results and Discussion

To validate radar interferometry results, ground displacement data from GNSS stations were compared with InSAR-derived time-series data at a specific point along the Mashhad-Sarakhs railway (61.09°E, 36.32°N). The comparison revealed uplift at a rate of less than 2 mm/year, alongside seasonal displacement patterns linked to regional water resource variations, confirming the accuracy of InSAR outputs with ground-based measurements. Subsidence analysis along the 3-km buffer of the railway, spanning January 2017 to December 2022, utilized 151 refined Sentinel-1 images processed with the NSBAS algorithm. The highest subsidence was observed in the southeastern outskirts of Mashhad, within the first 20 km of the route, reaching 200–260 mm in the sensor's line of sight. Further along the path, at approximately 55 km and 190 km, maximum subsidence values of 140 mm and 75 mm were recorded, respectively. Other segments of the route showed negligible or no significant displacement. Agricultural activity was prevalent from the start to the 60-km mark and again from 180 km onward, correlating strongly with subsidence zones, particularly in the initial 0–10 km stretch where the most substantial subsidence occurred. In contrast, the middle sections of the route, dominated by barren land or sparse pastures, exhibited minimal agricultural presence and correspondingly low subsidence rates, highlighting a clear link between land use and subsidence patterns along the railway corridor.

Conclusion

This study identified three significant subsidence zones along the Mashhad-Sarakhs railway, with the most pronounced occurring in the first 20 km (up to 200 mm) and another between 50–60 km (up to 150 mm), linked to intensive agricultural activity and groundwater over-extraction. Subsidence rates in southeastern Mashhad have risen from under 15 mm/year (2003–2009) to over 40 mm/year (2017–2023), correlating with declining groundwater levels. The initial 20-km segment, hosting 20% of the route's bridges, shows uneven and hazardous elevation changes, necessitating continuous monitoring. Integrating land use and hydrological data could enhance subsidence modeling, despite challenges from undocumented wells. Modern InSAR processing algorithms, offering improved accuracy and ease of use, proved effective for subsidence prediction and infrastructure risk management.



پایش فرونشست در حریم خطوط ریلی با الگوریتم LiCSBAS و روش تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی: راه آهن مشهد-سرخس)

سروش یاسینی^۱، حسین اعتمادفر^{۲*}

^۱دانش آموخته رشته علوم و مهندسی محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۲استادیار سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
در سال‌های اخیر پدیده فرونشست و وقوع آن در دشت‌ها، مناطق شهری و زیرساخت‌های حمل و نقل کشور ایران به نگرانی عمده‌ای تبدیل شده است. از این رو مطالعه حاضر، به بررسی اثرات این پدیده بر راه آهن مشهد-سرخس پرداخته است؛ چرا که این خط آهن با قرارگیری در منتهی‌الیه شرقی شبکه ریلی ایران و اتصال آن به کشورهای حوزه آسیای میانه، نقش مهمی در واردات و صادرات ایران ایفا می‌کند. در راستای بررسی میزان فرونشست این مسیر، با پردازش ۱۵۱ تصویر راداری سنجنده سنتینل-۱ به کمک الگوریتم نوین NSBAS و پیش‌پردازش داده‌ها در سامانه LiCSAR نرخ تجمعی فرونشست در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ محاسبه شد و به جهت تقلیل اثرات جوی از سامانه GACOS استفاده گردید. در گام بعد برای بررسی نقش پوشش اراضی بر فرونشست، به کمک سامانه متن‌باز Google earth engine نقشه پوشش اراضی محدوده مطالعاتی با چهار طبقه کاربری تولید شد. سپس پروفیل فرونشست در راستای ریل تولید و برای ارزیابی ارتباط فعالیت‌های کشاورزی و فرونشست، پروفیل فرونشست با طبقات کاربری اراضی تلفیق شد. نتایج پردازش InSAR نشان داد که سه پهنه فرونشستی در مسیر ریل وجود دارد؛ به طوری که برخی نواحی تا بیش از ۲۰۰ میلیمتر فرونشست داشته‌اند و محل وقوع فرونشست نیز عمدتاً در مناطق دارای فعالیت کشاورزی متمرکز قرار گرفته است. این مطالعه کیلومتر ۰ تا ۶۰ این مسیر را که دارای پل‌های روگذر و زیرگذر متعدد است، به عنوان پرمخاطره‌ترین بخش مسیر از نظر شدت فرونشست شناسایی کرد.	تاریخچه مقاله تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۶/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۱۲
	کلمات کلیدی:
	فرونشست زمین
	پایش اینسار
	زیرساخت ریلی
	کاهش آبهای زیرزمینی
	اثرات کشاورزی
	ارزیابی خطر

مقدمه

فرونشست^۱ پدیده‌ای محیط‌زیستی و زمین‌شناختی است که دلیل کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و به تبع آن، فشرده‌شدن خاک توسط پارامترهای انسانی و غیر انسانی رخ می‌دهد (Minh, Van Trung & Toan, 2015). این پدیده یکی از مهم‌ترین و گسترده‌ترین پیامدهای استخراج گستره آب از منابع آب‌های زیرزمینی است (Gambolati & Teatini, 2015)، که در اغلب مناطق کره زمین به خصوص مناطق خشک و نیمه‌خشک رخ می‌دهد. در نتیجه‌ی بهره‌کشی افراطی از منابع آب‌های زیر زمینی، اخلاص در چرخه تغذیه و تخلیه این منابع حاصل می‌شود که در نهایت موجب اضمحلال سفره‌های زیرزمینی خواهد شد (Foroughnia, Nemati, 2019; Maghsoudi & Perissin, 2019).

در کشور ایران همانند سایر کشورهای در حال توسعه، وقوع پدیده فرونشست ناشی از افزایش برداشت آب‌های زیرزمینی به جهت تامین نیاز روز افزون صنایع، شهرها و مناطق کشاورزی به آب، دارای پیشینه نسبتاً طولانی‌ای می‌باشد (Sharifikia, 2010). از طرف دیگر در مناطق شرقی و مرکزی ایران به دلیل رنج بردن از خشکسالی‌های متوالی، برداشت بی‌رویه از این منابع در سال‌های اخیر به شدت افزایش یافته است که نتیجه آن وقوع فرونشست با نرخ بسیار بالا در دشت‌های این مناطق از جمله دشت‌های مشهد، نیشابور و جوبین است (Khorrami, Abrishami & Maghsoudi, 2020).

در سالیان اخیر نگرانی‌های زیادی در زمینه مخاطرات پدیده فرونشست بر زیرساخت‌های شهری و غیر شهری ایجاد شده است (Foroughnia et al., 2019)، چراکه ظهور و گسترش این پدیده می‌تواند تأثیرات منفی بسیاری در درجات مختلف بر روی خطوط قطارهای سریع‌السیر، مسیرهای حمل‌ونقل ریلی، جاده‌های بین‌شهری، تونل‌ها و پل‌ها داشته باشد (Gao et al., 2023). همچنین به دلیل توسعه سریع عارضه‌های خطی بزرگ مقیاس انسان‌ساخت^۲ مانند خطوط راه‌آهن بین‌شهری و نقش کلیدی این مسیرها در توسعه اقتصادی کشورها، حمل و نقل کالا و جابجایی افراد در مسیرهای طولانی (Pietrzak & Pietrzak, 2019) و نیز احتمال وقوع خسارات جانی و مالی فراوان در صورت رخداد حادثه، ضرورت پایش پدیده فرونشست در محدوده خطوط ریلی در سراسر دنیا مورد توجه قرار گرفته است (Hooper, 2008; Berardino, Fornaro, Lanari & Sansosti, 2017; Luo, Zhou & Perissin, 2017).

روش تداخل‌سنجی رادار روزنه ساختگی^۳ (InSAR) یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های مطالعه فرونشست است (Luo et al., 2017). بر خلاف سایر روش‌های معمول اندازه‌گیری میزان فرونشست مانند ترازبایی دقیق و برداشت‌های GPS که هزینه‌بر، زمان‌بر و نیازمند حضور تکنسین در منطقه مورد نظر می‌باشند، روش InSAR به دلیل مستقل بودن از شرایط آب‌وهوایی و امکان بررسی پهنه‌های وسیع، می‌تواند به صورت گسترده برای پایش این مخاطره محیط‌زیستی مورد استفاده قرار گیرد (Ferretti et al., 2007). با این وجود دقت روش

1 Subsidence

2 large-scale manmade linear features

3 Interferometric Synthetic Aperture Radar

InSAR به وسیله عوامل مختلفی مانند خطاهای توپوگرافی، تاثیرات اتمسفری و خطاهای مربوط به مدار گردش ماهواره تحت تاثیر قرار می‌گیرد (Hooper, Segall & Zebker, 2007; Ferretti, Prati & Rocca, 2001)؛ به همین دلیل تکنیک‌هایی نظیر روش SBAS^۱ (Hooper, 2008; Berardino et al., 2002) و روش PSInSAR^۲ مطرح شدند (Ferretti et al., 2001, Hooper et al., 2007). تکنیک SBAS برای مناطق مختلفی که دارای پوشش گیاهی هستند قابل اجراست؛ این تکنیک که بر اساس فاصله زمانی و مکانی کوتاه میان تصاویر راداری می‌باشد دارای مزایایی از قبیل کاهش نویز و افزایش هم‌بستگی تصاویر به وسیله کاهش خطاهای مرحله رفع ابهام فاز می‌باشد (Berardino et al., 2002). در سال‌های اخیر با معرفی الگوریتم NSBAS^۳ روش جدیدی برای پرکردن شکاف زمانی-مکانی در شبکه تصاویر راداری ایجاد شد (Doin et al., 2011) که به وسیله آن امکان بررسی پدیده فرونشست با وجود شکاف در شبکه اینترفروگرامی در مناطقی نظیر زمین‌های کشاورزی که میزان هم‌بستگی تصاویر کم است، فراهم خواهد شد (Shami, Azar, Nilfouroushan, Salimi & Reshadi, 2022).

محققان بسیاری با کمک بسته‌های نرم‌افزاری متن‌باز مانند SNAP (Veci, 2015)، GMTSAR (Rosen, Gurrola, Sacco & Zebker, 2012)، ISCE (Sandwell, Mellors, Tong, Wei & Wessel, 2011) و STAMPS (Hooper, 2004) فرایندهای مختلف پیش‌پردازش و پردازش تصاویر راداری از قبیل تولید اینترفروگرام یا آنالیز سری زمانی را به انجام می‌رسانند؛ علاوه بر این نرم‌افزارها، برخی دیگر از محققان ترجیح می‌دهند از معادل تجاری و غیر متن‌باز نرم‌افزارهای فوق از قبیل SARPROZ (Perissin, Wang & Wang, 2011)، GAMMA (Werner, Wegmüller, Strozzi & Wiesmann, 2000) یا ENVI SARscape (Sahraoui, Hassaine, Serief & Hasni, 2006) برای اهداف تحقیقاتی خود بهره ببرند. علارغم قابلیت‌های فراوان فراهم‌شده توسط داده‌های راداری سنجنده سنتینل-۱، بهره بردن از توانایی‌های این سنجنده به خصوص استفاده از آن در مطالعات زمانی-مکانی بزرگ مقیاس، نیازمند رویکردهای مختلفی برای پیش‌پردازش داده‌ها می‌باشد. همچنین پردازش و ذخیره‌سازی این داده‌ها نیز با چالش‌هایی از قبیل نیاز به زیرساخت‌های رایانشی قدرتمند همراه است (Zinno et al., 2015). به همین دلیل در سالیان اخیر تلاش قابل توجهی برای رفع این مشکلات صورت گرفته که از بین آن‌ها می‌توان به سامانه LiCSAR^۴ اشاره کرد. این سامانه توسط محققان موسسه COMET^۵ توسعه یافته‌است که یکی از اهداف مهم آن، خودکار کردن بخشی از فرایند پیش‌پردازش داده‌های راداری و تسهیل مطالعات زمین‌شناختی طولانی مدت و بزرگ مقیاس می‌باشد (Lazecký et al., 2020).

1 Small Baseline Subset

2 Persistent Scatterer InSAR

3 New SBAS

4 Looking Into Continents from Space with Synthetic Aperture Radar

5 Centre for the Observation and Modelling of Earthquakes, Volcanoes and Tectonics

مطالعات متعددی در سال‌های گذشته بر جابجایی زمین با تمرکز اثرات آن بر روی عارضه‌های خطی مانند جاده‌ها و خطوط راه‌آهن صورت گرفته است. ینگ (Yang, 2015) با بررسی راه‌آهن سریع‌السير شماره ۱۱ واقع در جنوب انگلستان به وسیله پردازش تصاویر سنجنده Envisat در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و روش PSInSAR نشان دادند که این مسیر در اکثر نقاط باثبات اما در برخی نقاط دارای پتانسیل فرونشست است. لو و همکاران (Luo et al., 2017) در تحقیقی بر راه‌آهن عبوری از داخل شهر تیانجین واقع در شرق چین، با پردازش تصاویر ماهواره TerraSAR-X به روش MT-inSAR² و در بازه زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ نشان دادند بخش‌هایی از این مسیر با نرخ سالانه بیش از ۲۵ میلیمتر در حال فرونشست بوده است. چانگ و همکاران (Chang, Sakpal, Elberink & Wang, 2020) در مطالعه‌ای بر خط راه‌آهن باری Betuwe در کشور هلند با تلفیق روش PS-inSAR و اسکن لیزری، این مسیر را به دو کلاس مناطق پرخطر و پایدار طبقه‌بندی کردند. نتیجه این مطالعه نشان داد که این مسیر در برخی نقاط با نرخ ۲۰ میلی‌متر بر سال در حال فرونشست است. پولکاری و همکاران (Polcari, Moro, Romaniello & Stramondo, 2019) با مطالعه بر خطوط قطار ناحیه لومباری در شمال ایتالیا به وسیله تصاویر راداری سنجنده Cosmo-SkyMed در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ نشان دادند که در برخی مناطق از این محدوده، زمین با نرخ میانگین سالانه ۷ میلی‌متر در حال فرونشست است. منگ و همکاران (Meng, Shu, Wu & Yang, 2021) با مطالعه خط راه‌آهن سریع‌السير در شمال شرق کشور چین به وسیله روش PSInSAR نشان دادند که در بازه ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹ این عارضه با نرخ میانگین سالانه ۷ تا ۱۳ میلی‌متر در حال فرونشست در راستای سنجنده است. چن و همکاران (Chen et al., 2021) با بررسی راه‌آهن سریع‌السير بیجینگ-تیانجین واقع در کشور چین با پردازش داده‌های سنجنده‌های Envisat و TerrSAR-X و روش SBAS نشان دادند که در میانه‌ی مسیر، برخی نقاط تا نرخ سالانه ۷۰ میلی‌متر در حال فرونشست هستند. شامی و همکاران (Shami et al., 2022) با مطالعه راه‌آهن قم-کاشان واقع در کشور ایران به وسیله تصاویر سنجنده Sentinel-1 در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ و با روش NSBAS نشان دادند که در برخی مناطق این مسیر، فرونشست با نرخ ۲۳ میلی‌متر بر سال در حال رخ دادن است.

نتایج محققان فوق نشان‌دهنده این است که تداخل‌سنجی راداری یکی از روش‌های مرسوم و کاربردی برای مطالعه فرونشست زیرساخت‌ها است. این مطالعه به کمک الگوریتم نوین NSBAS و پردازش تصاویر راداری، به بررسی روند فرونشست در حریم ریلی راه‌آهن مشهد-سرخس می‌پردازد؛ چراکه این مسیر از جمله خطوط ریلی حائز اهمیت کشور ایران است که با واقع شدن در شمال شرق این کشور و اتصال شبکه ریلی کشورهای آسیای میانه به راه‌آهن سراسری ایران و ظرفیت جابجایی کالا به میزان ۴/۵ میلیون تن در سال، یکی از شاهراه‌های مهم ترانزیتی و همچنین واردات و صادرات کشور ایران به حساب می‌آید. با توجه به عبور این خط راه‌آهن از دشت‌هایی با فعالیت گستره کشاورزی، وجود تعداد کثیری از پل‌های روگذر و زیر گذر و همچنین عدم انجام هرگونه مطالعه بلندمدت فرونشست در مسیر این راه‌آهن، لازم است با بررسی بیشتر پدیده فرونشست بر

1 High Speed 1 (HS1)

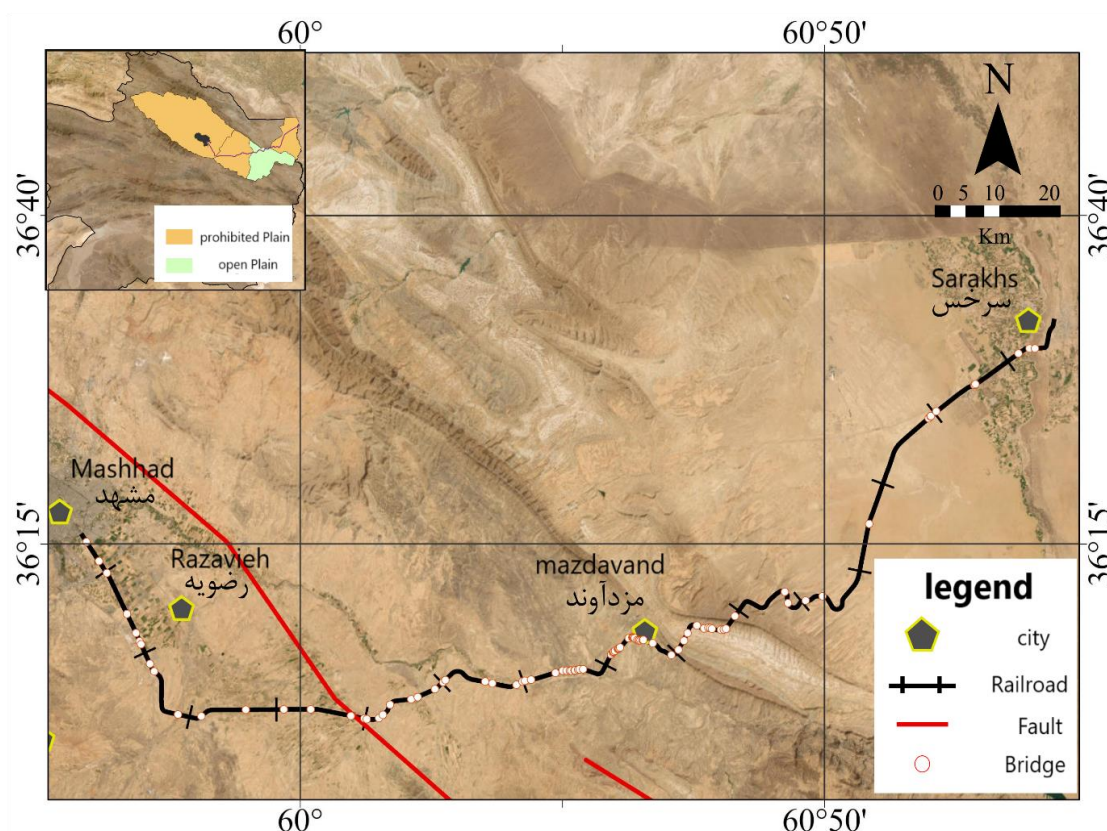
2 Multi-Temporal InSAR

این ریل، نقاط مخاطره‌آمیز آن شناسایی شده تا در صورت لزوم، راهکارهایی در آینده برای علاج‌یابی محدوده‌های پرخطر ارائه شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

خط راه‌آهن مشهد-سرخس با طول حدودی ۱۹۵ کیلومتر که نزدیک به ۵ کیلومتر آن خارج از مرزهای ایران است، در منتهی الیه شمال شرقی کشور بین $38^{\circ} 59'$ تا $61^{\circ} 14'$ طول شرقی و $36^{\circ} 1'$ تا $36^{\circ} 33'$ عرض شمالی، قرار گرفته است (شکل ۱). این مسیر ۳ سال پس از آغاز پروژه در تاریخ ۱۳۷۵ به بهره‌برداری رسید و از ویژگی‌های بارز آن می‌توان به احداث ۳ دهانه تونل مجموعاً به طول حدودی ۶ کیلومتر اشاره کرد. همچنین در طول محور خط راه‌آهن مشهد-سرخس، ۱۸ ایستگاه و ۲۷۰۰ متر پل احداث گردیده که شامل ۱۵ دستگاه پل بزرگ و ۳۸۶ دستگاه پل‌های متوسط و کوچک است (Parliament Research Center, 1996).



شکل ۱- موقعیت راه‌آهن سرخس-مشهد در شمال شرقی استان خراسان رضوی

Fig. 1. Location of the Sarakhs-Mashhad railway in the northeast of Razavi Khorasan Province

این راه‌آهن در حوضه آبریز قره‌قوم قرار گرفته است که اقلیم آن نیمه خشک تا خشک می‌باشد. حوضه آبریز قره‌قوم برخلاف مناطق جنوبی خراسان که از دشت‌های پهناور و کم ارتفاع تشکیل شده، ناحیه‌ای کوهستانی و مرتفع می‌باشد به گونه‌ای که چند دشت و واحد هیدروژئولوژیکی در میان رشته‌کوه قرار گرفته است و میزان بارندگی این حوضه از شمال غرب به جنوب شرق کاهش پیدا می‌کند (Ministry of Energy, 2010). همانطور که در شکل ۱ مشخص شده‌است، این خط‌آهن از ابتدای مسیر به ترتیب از چهار دشت مشهد، نریمانی، آق‌دربند و سرخس گذر می‌کند؛ حدود ۳۰ کیلومتر از مسیر ریل در دشت مشهد، ۲۵ کیلومتر در دشت نریمانی، ۳۲ کیلومتر در دشت آق‌دربند و حدود ۶۳ کیلومتر از آن در دشت سرخس واقع شده است که از این بین، بیش از ۱۶۰ کیلومتر از کل مسیر ۱۹۵ کیلومتری در دشت‌های ممنوعه یا ممنوعه بحرانی قرار گرفته است (Ministry of Energy, 2019).

روش انجام پژوهش

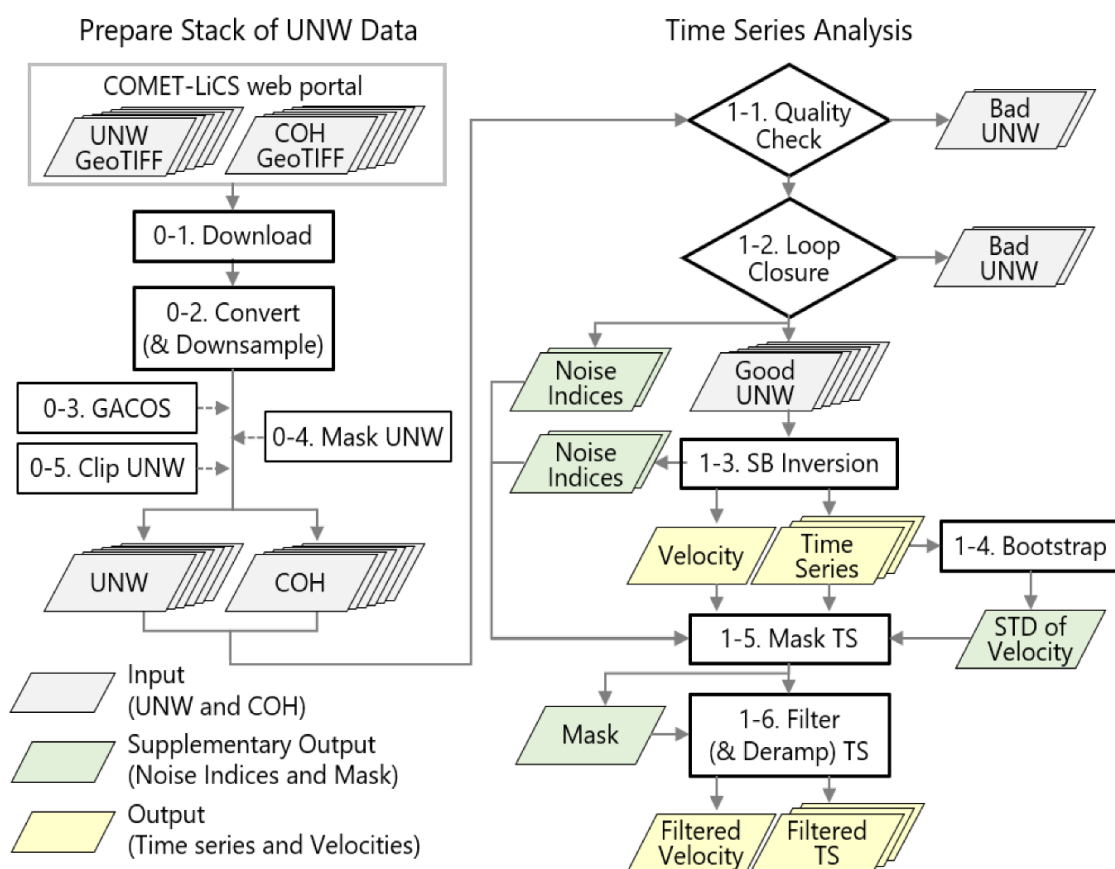
در مطالعه حاضر از داده‌های آماده‌سازی شده سامانه LiCSAR در بازه زمانی ۲۳ ژانویه ۲۰۱۷ تا ۲۳ دسامبر سال ۲۰۲۲ استفاده شد. در این سامانه تصاویر خام سنجنده سنتینل-۱ به صورت فریم‌های ۲۵۰ x ۲۵۰ کیلومتری کدگذاری و ذخیره شده‌اند (Lazecký et al., 2020). بدین صورت تعداد ۸۲۵ اینترفروگرام رفع ابهام شده^۱ و فایل همدوسی^۲ مربوط به محدوده مطالعاتی دانلود شدند. همانگونه که در شکل ۲ نمایش داده شده است، اینترفروگرام‌ها در مرحله آماده‌سازی با توجه به محدوده مطالعاتی ماسک و برش داده شدند و نواحی خارج از محدوده مطالعاتی از فرایند کنار گذاشته شد. از آنجایی که اثرات جوی با ایجاد نویز در مطالعات مکانی-زمانی بزرگ‌مقیاس ممکن است موجب پنهان شدن تغییرات واقعی سطح زمین شوند، در این مطالعه از داده‌های سامانه GACOS به منظور اصلاح اثرات جوی استفاده شد (Yu, Li, Penna & Crippa, 2018).

گام پردازش و آنالیز سری زمانی، دارای شش بخش اصلی است؛ با توجه به فلوچارت فوق، در گام نخست بایستی کیفیت داده‌ها بررسی و موارد نامناسب حذف شوند. برخی اینترفروگرام‌های اولیه به دلیل وجود برف یا پوشش گیاهی متراکم ممکن است دارای پیکسل‌هایی با میزان همدوسی پایین باشند؛ همچنین گاهی تعدادی از اینترفروگرام‌ها در بازه مطالعاتی می‌توانند به دلایل مختلف، ناقص باشند. برای بررسی این موارد، میانگین همدوسی هر اینترفروگرام محاسبه شد، سپس اینترفروگرام‌هایی که میانگین همدوسی آن‌ها کمتر از ۰/۳ بود، از فرایند پردازش کنار گذاشته شدند (Morishita et al., 2020). این داده‌ها ممکن است دارای خطاهایی رفع ابهام^۳ باشند که موجب کاهش دقت و صحت در برآورد جابجایی سطح زمین خواهد شد؛ بنابراین لازم است در گام دوم پردازش، این عوامل شناسایی و از فرایند حذف شوند (Zhang, Fattahi & Amelung, 2019).

1 Unwrapped

2 Coherence

3 Unwrapping errors



شکل ۲- فلوچارت مراحل مختلف مطالعه

Fig. 2. Flowchart of the various study stages

جهت شناسایی اینترفروگرام‌های دارای خطای چشمگیر، از الگوریتم حلقه‌ی بسته^۱ استفاده شد؛ به طوری که از سه تصویر راداری ϕ_1 ، ϕ_2 و ϕ_3 ، سه اینترفروگرام ϕ_{12} ، ϕ_{13} و ϕ_{23} تولید خواهد شد که حلقه فاز^۲ آن‌ها به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Biggs, Wright Lu & Parsons, 2007):

$$\phi_{123} = \phi_{12} + \phi_{23} - \phi_{131} \quad (1)$$

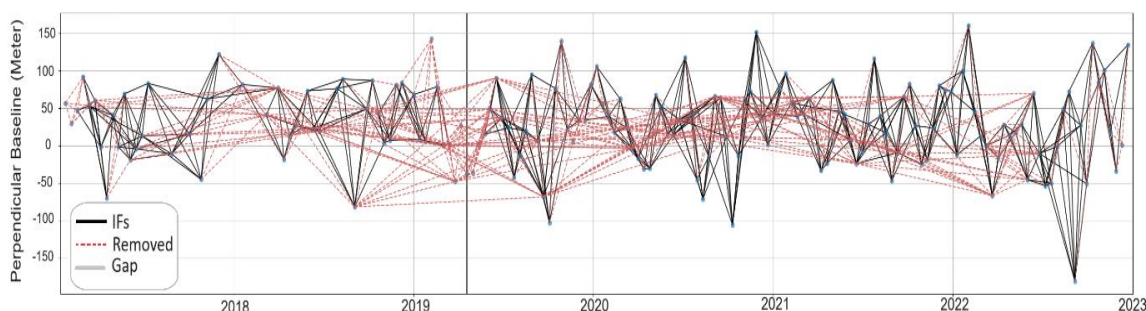
اگر هیچ خطای رفع ابهامی در اینترفروگرام‌ها وجود نداشته باشد، ϕ_{123} میبایست نزدیک به صفر باشد اما در صورتی که یک یا چند اینترفروگرام دارای خطا باشند، ϕ_{123} نزدیک به مضرب صحیحی از 2π خواهد بود. با محاسبه RMS^3 حلقه فازهای تشکیل‌شده در کل بازه زمانی و قرارداد حد آستانه $1/5$ رادین برای خطای

1 Loop Closure

2 Loop phase or Loop Triplet

3 Root Mean Square

قابل چشم‌پوشی، اینترفروگرام‌های نامناسب شناسایی و از ادامه فرایند کنار گذاشته شدند (Morishita et al., 2020). در شکل ۳ شبکه اینترفروگرامی تصاویر، پیش از پالایش و پس از آن مشخص شده است.



شکل ۳- شبکه اینترفروگرام تصاویر

Fig. 3. Image interferogram network

همانطور که در شکل بالا نمایش داده شده است، خطوط قرمز نمایانگر اینترفروگرام‌های حذف‌شده و خطوط سیاه نیز اینترفروگرام‌های استفاده‌شده در فرایند پردازش است. همچنین خط تیره عمودی نشانگر شکاف در شبکه اینترفروگرامی فوق به دلیل حذف برخی از تصاویر می‌باشد.

در گام سوم، آنالیز سری‌زمانی بر اینترفروگرام‌های باقی مانده اعمال شد؛ این مرحله با اجرای الگوریتم NSBAS و با فرض خطی بودن جابجایی‌های ناشی از فرونشست بین هر دو برداشت داده راداری به اجرا رسید، که نتیجه آن نرخ سالانه و نرخ تجمعی فرونشست در بازه مطالعاتی خواهد بود. در همین گام نقطه مرجع^۱ به مختصات ۳۶/۳۹۶ درجه شمالی و ۶۰/۸۴۲ درجه شرقی انتخاب شد که معیار این انتخاب، پیکسلی با کمترین میزان RMS در کل حلقه‌های فاز است. در گام چهارم به کمک روش Boot Strapping با صد تکرار، انحراف معیار نرخ سالانه فرونشست محاسبه شد. در صورتی که این شاخص از حد آستانه تعریف‌شده بالاتر باشد، می‌تواند ناشی از غیرخطی بودن رفتار جابجایی زمین یا وجود نویز شدید در داده‌های ورودی باشد (Morishita et al., 2020). در گام پنجم پردازش، جهت حذف داده‌های پرت^۲ به کمک شاخص‌های نویز (جدول ۱) پیکسل‌های نامطلوبی که از حد آستانه مطلوبیت فراتر بودند، شناسایی و حذف شدند. در گام نهایی، فیلترهای مختلف مکانی-زمانی برای به حداقل رساندن اثرات نامطلوب از قبیل خطای رمپ مداری^۳ و اثرات جوی اعمال شد.

1 Referecne point

2 Outlier

3 Orbital ramp

جدول ۱ - شاخص‌های نویز در گام فیلتر کردن خروجی

Table 1-Noise indices in the output filtering step

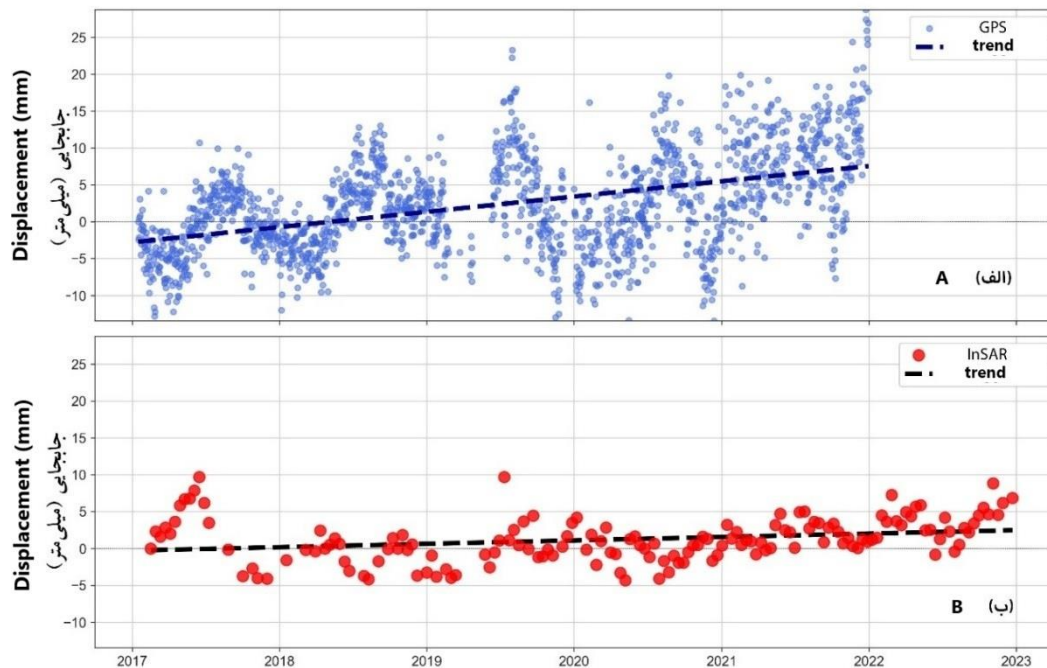
حد آستانه Threshold	شاخص‌های نویز Noise index
0.05	کمترین میزان میانگین همدوسی Threshold of average coherence
1.5	کمترین میزان نسبت تعداد اینترفروگرام‌های استفاده شده به تعداد تصاویر Threshold of number of used unwrap data
100	بیشترین میزان انحراف معیار نرخ سالانه جابجایی (میلی‌متر بر سال) Threshold of std of the velocity (mm/year)
1	بیشترین میزان فاصله زمانی اینترفروگرام دو تصویر (سال) Threshold of max time length of connected network (year)
10	بیشترین تعداد شکاف و عدم پیوستگی در شبکه اینترفروگرامی Threshold number of gaps in network
5	کمترین مقدار پیوستگی مکانی-زمانی (میلی‌متر) Threshold of spatio-temporal consistency (mm)
50	بیشترین تعداد اینترفروگرام‌های فاقد حلقه‌ی فاز Threshold of number of interferograms with no loop
5	بیشترین تعداد حلقه‌ی فاز دارای خطا Threshold of number of loop error
2	بیشترین میزان RMS هر پیکسل در سری زمانی (میلی‌متر) Threshold of number of loop error

نتایج و بحث

صحت‌سنجی نتایج

برای راستی‌آزمایی نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری، از داده‌های ایستگاه‌های دائمی زمینی استفاده شد. بدین منظور جابجایی روزانه ایستگاه دائم ژئودینامیک سرخس به مختصات $۶۱^{\circ} ۰۹'$ طول شرقی و $۳۶^{\circ} ۳۲'$ عرض شمالی با سری زمانی حاصل از پردازش InSAR همان نقطه مقایسه گردید.

مقایسه مشاهدات حاصل از برداشت‌های GPS ایستگاه سرخس (شکل ۴-الف) و تداخل‌سنجی راداری همان نقطه (شکل ۴-ب) نمایان‌گر وقوع بالاآمدگی با نرخ کمتر از ۲ میلی‌متر بر سال است؛ علاوه بر آن، در دو نمودار فوق‌الگوی جابجایی فصلی به علت تغییرات در منابع آب منطقه نیز قابل مشاهده است. بنابراین داده‌های ایستگاه زمینی GPS، صحت داده‌های حاصل از تداخل‌سنجی راداری را مورد تایید قرار می‌دهد.



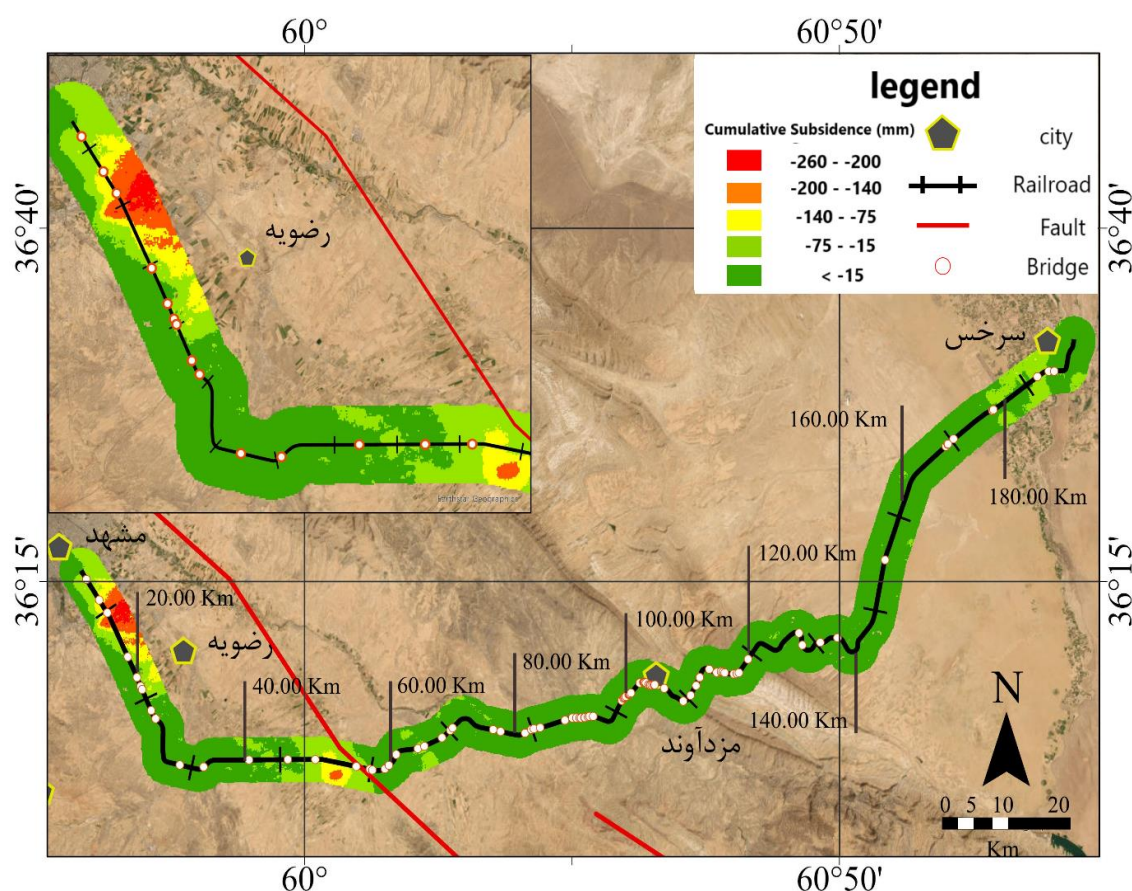
شکل ۴ - مقایسه جابجایی حاصل از GPS (الف) و InSAR (ب) در ایستگاه سرخس

Fig. 4. Comparison of displacement obtained from GPS (a) and InSAR (b) at Sarakhs station

ارزیابی میزان فرونشست با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و الگوریتم NSBAS

برای تولید نقشه فرونشست محدوده مطالعاتی، پس از پالایش تصاویر و اینترفروگرام‌های نامناسب حاصل از آن‌ها از ۱۵۱ تصویر سنتینل-۱ استفاده شد (شکل ۵). بررسی میزان فرونشست در حریم سه کیلومتری خط راه‌آهن مشهد-سرخس در بازه ۲۳ ژانویه ۲۰۱۷ تا ۲۳ دسامبر سال ۲۰۲۲ نشان می‌دهد که بیشترین میزان فرونشست در جنوب شرقی شهر مشهد و در ۲۰ کیلومتر ابتدای این مسیر مشاهده شده است. به طوری که در این بخش از مسیر، حداکثر میزان فرونشست در راستای سنجنده ۲۰۰ تا ۲۶۰ میلی‌متر برآورد شده است.

علاوه بر آن در حدود کیلومتر ۵۵ و ۱۹۰ از این مسیر به ترتیب حداکثر تا ۱۴۰ و ۷۵ میلی‌متر فرونشست برآورد شده است. سایر نواحی این مسیر عمدتاً فاقد فرونشست بوده یا میزان جابجایی چشمگیری برای آن برآورد نشده است.



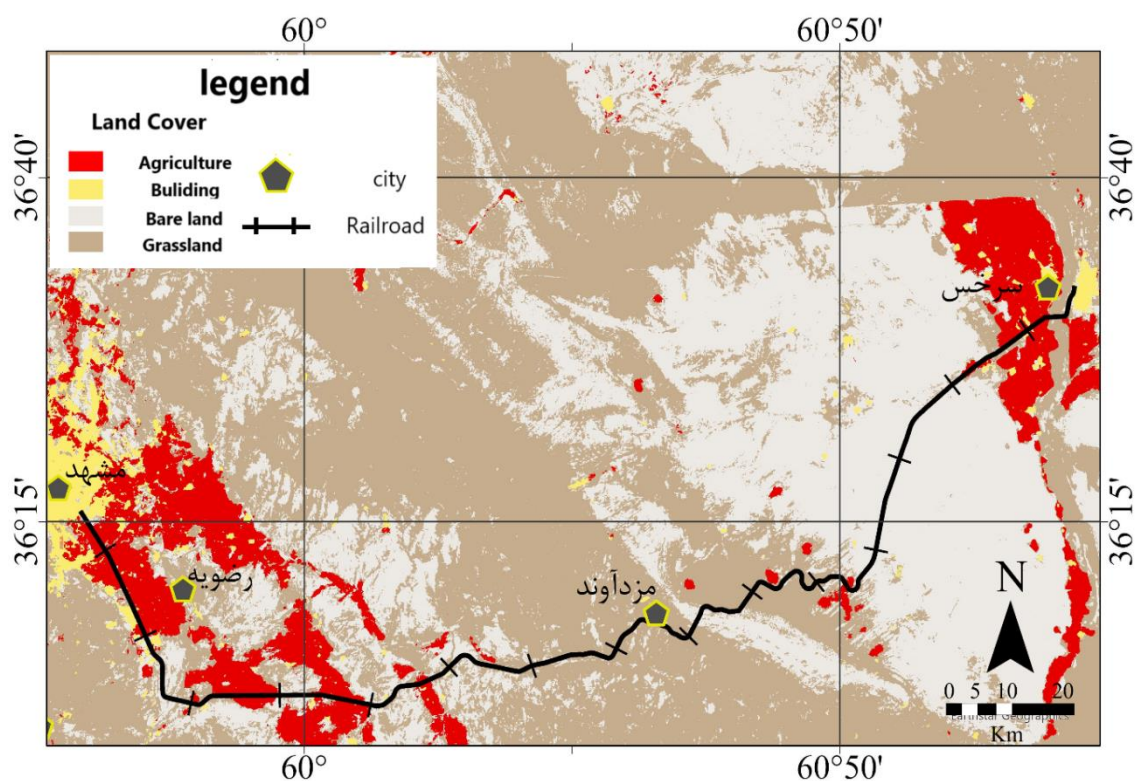
شکل ۵ - نقشه فرونشست تجمعی در حریم ۳ کیلومتری خط راه آهن (۲۰۱۷-۲۰۲۳)

Fig. 5. Cumulative subsidence map within a 3-kilometer buffer of the railway line (2017–2023)

بررسی و تحلیل ارتباط کاربری و پوشش اراضی با فرونشست در محدوده مطالعاتی

برای بررسی رابطه میان پوشش اراضی و فرونشست زمین، نقشه پوشش اراضی سال ۲۰۲۲ میلادی به کمک تصاویر ماهواره سنتینل-۲ با رزولوشن ۱۰x۱۰ متر با ۱۱ طبقه در سامانه گوگل ارث انجین تولید شد (Karra et al., 2021). سپس برای یکسان سازی تفکیک پذیری نقشه پوشش اراضی با نقشه فرونشست، این داده با الگوریتم نزدیک ترین همسایه^۱ به رزولوشن ۱۰۱ x ۱۰۱ متر تبدیل و در نهایت نقشه پوشش اراضی با ۴ طبقه زمین زراعی، ساختمان، زمین بایر و مرتع برای محدوده تولید شد که در شکل ۶ موقعیت مکانی راه آهن در نقشه پوشش اراضی نمایش داده شده است.

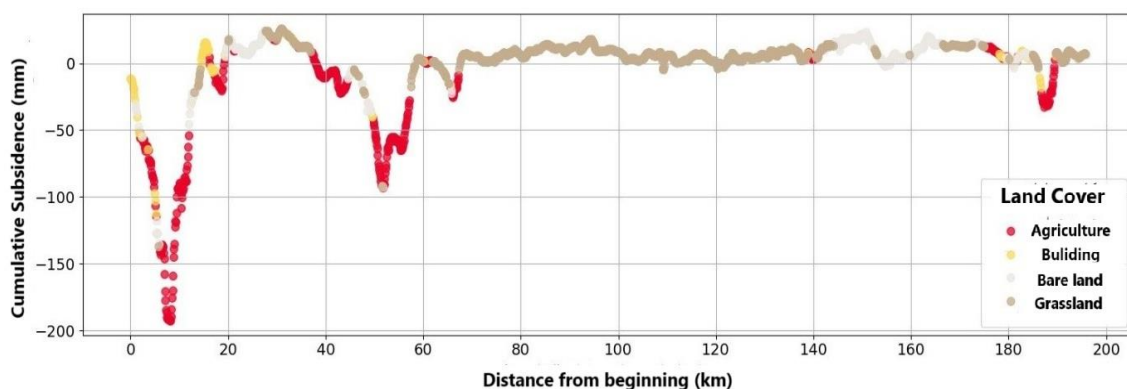
1 Nearest Neighbour



شکل ۶ - نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی

Fig. 6. Land Cover map of the study area

همانگونه که در شکل ۶ مشخص شده است، نتایج حاصله حاکی از وجود فعالیت‌های کشاورزی در کیلومتر صفر تا کیلومتر ۶۰ مسیر است؛ همچنین در انتهای مسیر و عمدتاً از کیلومتر ۱۸۰ به بعد نیز فعالیت‌های کشاورزی مشاهده می‌شود. عمده‌ی بخش میانی مسیر فاقد اراضی کشاورزی بوده یا فعالیت کشاورزی به صورت پراکنده وجود دارد.



شکل ۷ - پروفیل ترکیبی فرونشست راه‌آهن با پوشش اراضی حریم ریلی

Fig. 7. Composite subsidence profile of the railway with land cover of the rail buffer zone

در شکل ۷ پروفیل فرونشست در راستای مسیر راه آهن به نمایش گذاشته شده است. جهت بررسی دقیق تر ارتباط فرونشست با کاربری اراضی، طبقه بندی انواع کاربری ها به پروفیل افزوده شد. با توجه به شکل ۷، از محدوده کیلومتر ۰ تا کیلومتر ۱۰ مسیر (که بیشترین میزان فرونشست در آن رخ داده است) بخش عمده ی کاربری محدوده، ذیل فعالیت های کشاورزی می باشد. ارتباط فعالیت های کشاورزی با وقوع فرونشست در سایر نواحی مانند کیلومتر ۴۰ تا ۶۰ و ۱۸۵ تا ۱۹۰ نیز در این شکل قابل مشاهده است. از سوی دیگر، در بقیه طول مسیر عمده پوشش اراضی به صورت زمین بایر یا مراتع تنک است و به طول کلی فاقد فعالیت های کشاورزی متمرکز و متراکم می باشد.

نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد در طول راه آهن مشهد-سرخس، سه ناحیه دارای فرونشست قابل توجه هستند که از میان آن ها، در ناحیه اول مابین کیلومتر ۰ تا ۲۰ این مسیر، تا حدود ۲۰۰ میلیمتر فرونشست مشاهده شده است و در ناحیه دوم مابین کیلومتر ۵۰ تا ۶۰ نیز تا ۱۵۰ میلیمتر فرونشست برآورد شده است. بررسی نتایج مطالعات گذشته بر محدوده جنوب شرقی شهر مشهد و مقایسه آن با نتایج این تحقیق، نشان داد که نرخ فرونشست در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۰۹ از کمتر از ۱۵ میلیمتر در سال، به بیش از ۴۰ میلیمتر در سال در بازه زمانی ۲۰۱۷-۲۰۲۳ افزایش پیدا کرده است. بررسی های گذشته در این منطقه نشان دادند که وقوع فرونشست، معلول دو عامل بهره برداری بی رویه از سفره های آب های زیرزمینی و جلوگیری از نفوذ آب برگشتی از بخش های کشاورزی، صنعتی و شرب به آبخوان بوده است (Behniafar, Ghanbarzadeh & Eshraghi, 2010). مقایسه سری زمانی تراز آب چاه های پیژومتری با سری زمانی فرونشست در جنوب شرقی شهر مشهد که بخش ابتدایی راه آهن مشهد-سرخس در آن واقع شده است، نشان دهنده رابطه مستقیم افت تراز آب با فرونشست است؛ وجود این رابطه مستقیم بین رخداد پدیده فرونشست با افت قابل ملاحظه تراز آب های زیرزمینی می تواند تاثیر گرفته از فعالیت های کشاورزی متمرکز و برداشت بی رویه از چاه های آب در این منطقه باشد (Salehi Moteahd, Hafezi Moghaddas, Lashkaripour & Dehghani, 2019). علاوه بر آن، وجود چاه های غیرمجاز آب که فاقد هرگونه داده رسمی از قبیل میزان و الگوی برداشت است، در مزارع امری محتمل است؛ از این رو دسترسی به داده های مکانی قنات ها و گسل های محلی، موقعیت چاه ها و میزان برداشت آب در منطقه به مدل سازی دقیق تر رفتار فرونشست کمک خواهد کرد. یکنواخت نبودن وقوع فرونشست و بالا بودن میزان تغییرات ارتفاعی زمین در بیست کیلومتر ابتدایی مسیر، از جمله مواردی است که می تواند برای این مسیر ایجاد مخاطره کند. لازم به ذکر است که حدود ۲۰ درصد پل های خط راه آهن مشهد-سرخس در حدفاصل کیلومتر ۰ تا ۶۰ که دارای بیشترین نرخ فرونشست هستند، واقع شده اند؛ این موضوع بیانگر حساسیت بیشتر این بخش از مسیر و نشان دهنده لزوم پایش مستمر آن می باشد. مطالعه حاضر با در نظر گرفتن موارد فوق سعی بر آن داشت که کاربرد الگوریتم های جدید پردازش تصاویر راداری را برای تخمین و پیش بینی رخداد فرونشست نشان دهد. از آنجایی که این الگوریتم ها دارای خطای کمتر و دقیق و سهولت بکارگیری بالاتری نسبت به روش های

مرسوم تداخل‌سنجی راداری هستند، می‌توانند در صورت تلفیق با سایر داده‌ها از قبیل پوشش اراضی و شاخصه‌های جمعیتی و اقتصادی، کاربرد ویژه‌ای در پیشگیری و مدیریت مخاطرات محیط‌زیستی مانند پدیده فرونشست زیرساخت‌ها، داشته باشد.

References

- Behniafar, A., Ghanbarzadeh, H., & Eshraghi, A. (2010). Investigation of factors affecting subsidence in the Mashhad plain and its geomorphic consequences. *Zagros Perspective Geographical Quarterly*, 2(5), 131–146. [In Persian]
- 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>
- Biggs, J., Wright, T., Lu, Z., & Parsons, B. (2007). Multi-interferogram method for measuring interseismic deformation: Denali Fault, Alaska. *Geophysical Journal International*, 170(3), 1165–1179. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03415.x>
- Chang, L., Sakpal, N. P., Elberink, S. O., & Wang, H. (2020). Railway infrastructure classification and instability identification using Sentinel-1 SAR and laser scanning data. *Sensors*, 20(24), 7108. <https://doi.org/10.3390/s20247108>
- Chen, B., Gong, H., Chen, Y., Lei, K., Zhou, C., Si, Y., ... & Gao, M. (2021). Investigating land subsidence and its causes along Beijing high-speed railway using multi-platform InSAR and a maximum entropy model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96, 102284. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102284>
- Doin, M. P., Lodge, F., Guillaso, S., Jolivet, R., Lasserre, C., Ducret, G., ... & Pinel, V. (2011). Presentation of the small baseline processing chain on a case example: The etan deformation monitoring from 2003 to 2010 using envisat data. In *Fringe Symposium*. <https://ens.hal.science/hal-02185213>
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20. <http://dx.doi.org/10.1109/36.898661>
- Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., ... & Rocca, F. (2007). Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(5), 1142–1153. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2007.894440>
- Foroughnia, F., Nemati, S., Maghsoudi, Y., & Perissin, D. (2019). An iterative PS-InSAR method for the analysis of large spatio-temporal baseline data stacks for land subsidence estimation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74, 248–258. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.018>

- Gambolati, G., & Teatini, P. (2015). Geomechanics of subsurface water withdrawal and injection. *Water Resources Research*, 51(6), 3922-3955. <https://doi.org/10.1002/2014WR016841>
- Gao, F., Zhao, T., Zhu, X., Zheng, L., Wang, W., & Zheng, X. (2023). Land subsidence characteristics and numerical analysis of the impact on major infrastructure in Ningbo, China. *Sustainability*, 15(1), 543. <https://doi.org/10.3390/su15010543>
- Hooper, A. (2004). StaMPS (Stanford Method for PS) Manual. http://sismologia.ist.utl.pt/files/StaMPS_manual.pdf
- Hooper, A. (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(16), L16302. <http://dx.doi.org/10.1029/2008GL034654>
- Hooper, A., Segall, P., & Zebker, H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7), B07407. <http://dx.doi.org/10.1029/2006JB004763>
- Karra, K., Kontgis, C., Statman-Weil, Z., Mazzariello, J. C., Mathis, M., & Brumby, S. P. (2021). Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning. In *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS* (pp. 4704–4707). <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553499>
- Khorrami, M., Abrishami, S., & Maghsoudi, Y. (2020). Mashhad Subsidence Monitoring by Interferometric Synthetic Aperture Radar Technique. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51(6), 1187-1204. [In Persian] <https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14300.5617>
- 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>
- Luo, Q., Zhou, G., & Perissin, D. (2017). Monitoring of subsidence along Jingjin inter-city railway with high-resolution TerraSAR-X MT-InSAR analysis. *Remote Sensing*, 9(7), 717. <https://doi.org/10.3390/rs9070717>
- Meng, Z., Shu, C., Wu, Q., & Yang, Y. (2021). Monitoring surface deformation of high-speed railway using time-series InSAR method in northeast China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 660(1), 012011. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/660/1/012011>
- Minh, D. H. T., Van Trung, L., & Toan, T. L. (2015). Mapping ground subsidence phenomena in Ho Chi Minh City through the radar interferometry technique using ALOS PALSAR data. *Remote Sensing*, 7(7), 8543–8562. <https://doi.org/10.3390/rs70708543>
- Ministry of Energy. (2010). *Updating the integration of water resources studies, Qareh Qom watershed, Volume 2: Reviews and general specifications*. Office of Basic Water Resources Studies. [In Persian]
- Ministry of Energy. (2019). *Prohibited plains*. Office of Protection and Utilization of Water Resources and Subscriber Affairs. [In Persian]

- Morishita, Y., Lazecký, M., Wright, T. J., Weiss, J. R., Elliott, J. R., & Hooper, A. (2020). LiCSBAS: An open-source InSAR time series analysis package integrated with the LiCSAR automated Sentinel-1 InSAR processor. *Remote Sensing*, 12(3), 424. <https://doi.org/10.3390/rs12030424>
- Parliament Research Center. (1996). *Opening of the Mashhad-Sarakhs-Tejen railway line with a look at the situation of Sarakhs*. [In Persian]
- Perissin, D., Wang, Z., & Wang, T. (2011). The SARPROZ InSAR tool for urban subsidence/manmade structure stability monitoring in China. In *34th International Symposium on Remote Sensing*. Sydney, Australia.
- Pietrzak, O., & Pietrzak, K. (2019). The role of railway in handling transport services of cities and agglomerations. *Transportation Research Procedia*, 39, 405-416. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.043>
- Polcari, M., Moro, M., Romaniello, V., & Stramondo, S. (2019). Anthropogenic subsidence along railway and road infrastructures in Northern Italy highlighted by CosmoSkyMed satellite data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(2), 024515. <http://dx.doi.org/10.1117/1.JRS.13.024515>
- Rosen, P. A., Gurrola, E., Sacco, G. F., & Zebker, H. (2012). The InSAR scientific computing environment. In *Proceedings of the EUSAR 2012*. Nuremberg, Germany.
- Sahraoui, O. H., Hassaine, B., Serief, C., & Hasni, K. (2006). Radar interferometry with Sarscape software. *Photogrammetry and Remote Sensing*, 1-10.
- Salehi Moteahd, F., Hafezi Moghaddas, N., Lashkaripour, G., & Dehghani, M. (2019). Land Subsidence and its Consequences in Mashhad City by Integrating Radar Interferometry and Field Measurements. *Journal of Engineering Geology*, 13(3), 435-462. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jeg.13.3.435>
- Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M., & Wessel, P. (2011). Open radar interferometry software for mapping surface deformation. *EOS Transactions, American Geophysical Union*, 92(28), 234. <https://doi.org/10.1029/2011EO280002>
- Shami, S., Azar, M. K., Nilfouroushan, F., Salimi, M., & Reshadi, M. A. M. (2022). Assessments of ground subsidence along the railway in the Kashan plain, Iran, using Sentinel-1 data and NSBAS algorithm. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112, 102898. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102898>
- Sharifikia, M. (2010). Investigation of the consequences of the subsidence phenomenon in residential lands and plains of Iran. *Journal of the Iranian Geological Engineering Association*, 3(3-4), 43-58. [In Persian] https://www.jiraeg.ir/article_68238.html
- Veci, L. (2015). Interferometry tutorial. Array Systems. Available online: <http://sentinel1.s3.amazonaws.com>.
- Werner, C., Wegmüller, U., Strozzi, T., & Wiesmann, A. (2000). Gamma SAR and interferometric processing software. In *Proceedings of the ERS-ENVISAT Symposium*. Gothenburg, Sweden. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:28598270>
- Yang, Z. (2015). *Monitoring and predicting railway subsidence using InSAR and time series prediction techniques* (Doctoral dissertation). <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/6377/>

- Yu, C., Li, Z., Penna, N., & Crippa, P. (2018). Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(10), 9202–9222. <https://doi.org/10.1029/2017JB015305>
- Zhang, Y., Fattahi, H., & Amelung, F. (2019). Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction. *Computers & Geosciences*, 133, 104331. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104331>
- Zinno, I., Elefante, S., Luca, C. D., Manunta, M., Lanari, R., & Casu, F. (2015). New advances in intensive DInSAR processing through cloud computing environments. In *Proceedings of the IGARSS 2015* (pp. 5264–5267). Milan, Italy. <http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7327022>



Assessment of landslide sensitivity and determination of effective factors in its occurrence using the random forest algorithm

(Case study: Glandrood watershed)

Ali Gilanipoor^a, Sadroddin Motevalli^{b*}, Khabat Derafshi^c

^a Ph.D. Student in Climatology, Department of Geography, Islamic Azad University of Noor, Noor, Iran

^b Associate Professor, Department of Geography, Islamic Azad University of Noor, Noor, Iran

^c Department of Natural Heritage, Research Institute of Cultural Heritage and Tourism, Tehran, Iran

Article Info

Abstract

Article history

Received: 22 August 2024

Received in revised form:
10 January 2025

Accepted: 20 January 2025

Available online:
21 March 2025

Keywords:

Landslide ,
Susceptibility
Assessment, Random
Forest Algorithm,
Glandrood Watershed

The Glandrood watershed, given its geological, tectonic, climatic, hydrological characteristics, topography, and poor vegetation cover, has a landslide potential, and inappropriate human intervention in it leads to the occurrence and intensification of mass movements. In the present study, using a descriptive-analytical and survey approach, an attempt has been made to prepare a sensitivity map for slope instability and landslides in the study area using 11 factors effective in causing slope instability. These factors include: slope, aspect direction, elevation, distance from the road, distance from the fault, distance from the waterway, total annual precipitation, average annual temperature, land use, geology, and slope curvature. Then, a total of 352 landslide points were identified using satellite images and field visits, of which 70% were used for model training and the remaining 30% for validation. Subsequently, the random forest algorithm was coded in the MATLAB R2020a environment to identify areas susceptible to landslides. According to the landslide hazard map in the Glandrood watershed, over 30% of the area is classified as "very high risk," 19% as "high risk," 13% as "medium risk," 19% as "low risk," and 16% of the study area is classified as "very low" landslide risk. The prioritization of effective variables indicates that the highest weight, with a criterion ranking of 0.98, is related to elevation. The analysis of the catena concept, which reflects the relationship between soil patterns and landscape slopes with topography and leads to variability in soil properties and subsequently changes in vegetation cover, can well justify the relationship or influence of the elevation factor on landslide movements in the study area.

*.Corresponding author : Dr. Sadroddin Motevalli E-mail address: sadr_m1970@yahoo.com

How to cite this article: Gilanipoor, A., Motevalli, S., & Derafshi, K. (2025). Assessment of landslide sensitivity and determination of effective factors in its occurrence using the random forest algorithm(Case study: Glandrood watershed). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), pp. 247-274 ,DOI: <https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.89542.1514>



Extended Abstract

Introduction

Landslides are one of the most common natural phenomena that generally occur in mountainous regions around the world. In many cases, they lead to financial and human losses and are recognized as a natural disaster. Continuous monitoring of surface changes and identifying areas prone to slope movements, including landslides—especially in human settlements and infrastructure such as roads and railways—are among the most effective factors in reducing the casualties and financial losses from natural hazards like landslides. Many researchers have attempted to present models for hazard zoning of landslide phenomena, or in other words, to create landslide hazard maps, primarily based on inductive methods, quantitative, and statistical modeling. They have examined various factors influencing the occurrence of landslides and then analyzed how these factors affect the distribution of landslides. By correlating the landslide hazard map with land use maps, it is possible to identify areas at risk, including cities, villages, bridges, factories, and other structures, so that necessary measures can be taken to protect these assets.

Materials and Methods

The study area is located in Mazandaran Province, south of Noor County, within the Glandrood watershed, in the central part of the Alborz Mountain range. It is part of the larger Haraz watershed. The Glandrood watershed, given its geological, tectonic, climatic, and hydrological characteristics, topography, and poor vegetation cover, has a landslide potential, and inappropriate human intervention in it leads to the occurrence and intensification of mass movements. In the present study, using a descriptive-analytical and survey approach, an attempt has been made to prepare a sensitivity map for slope instability and landslides in the study area using 11 factors that are effective in causing slope instability. These factors include: slope, aspect direction, elevation, distance from the road, distance from the fault, distance from the waterway, total annual precipitation, average annual temperature, land use, geology, and slope curvature. Then, a total of 352 landslide points were identified using satellite images and field visits, of which 70% were used for model training and the remaining 30% for validation. Subsequently, the random forest algorithm was coded in the MATLAB R2020a environment to identify areas susceptible to landslides.

Results and Discussion

According to the landslide hazard map in the Glandrood watershed, over 30% of the area is classified as "very high risk," 19% as "high risk," 13% as "medium risk," 19% as "low risk," and 16% of the study area is classified as "very low risk" for landslides. The prioritization of effective variables indicates that the highest weight, with a criterion ranking of 0.98, is related to elevation. The analysis of the catena concept, which reflects the relationship between soil patterns and landscape slopes with topography and leads to variability in soil properties and subsequently changes in vegetation cover, can well justify the relationship or influence of the elevation factor on landslide movements in the study area. The study of slope movements in the examined watershed indicates that this area is prone to landslides due to natural conditions such as fault structures, steep slopes,

humid climate, and sensitive and non-resistant soil. Human intervention in this area leads to the creation and intensification of these movements.

Conclusion

Identifying landslide-prone areas and evaluating landslide susceptibility is crucial for avoiding these areas and implementing preventive and control methods. One of the main actions in this regard is the preparation of landslide hazard susceptibility maps. Planners and decision-makers can use these maps in various fields such as soil and natural resource conservation management, infrastructure and tourism planning, land allocation for urban and rural development, environmental planning, and determining the routes for roads and power transmission lines. Additionally, determining the impact and importance of each variable on the occurrence of slope movements can be the next step in reducing and controlling these movements in the study area. Modeling using the random forest algorithm based on the variables affecting slope movements in the Glandrood watershed indicates that the largest area of this watershed falls within the classes with very high and high landslide susceptibility. The analysis of the relationship between landslide occurrence and influencing factors shows that elevation is the most significant factor affecting this phenomenon in the study area. To justify the impact of elevation as the most important factor, the relationship between vegetation density and elevation in the Glandrood watershed can be mentioned.



ارزیابی حساسیت زمین لغزش و تعیین عوامل مؤثر در وقوع آن با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گلندرود)

علی گیلانی پور^۱،  صدرالدین متولی^{۲*}،  خه بات درفش^۳

^۱دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، واحد نور دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران

^۲دانشیار گروه جغرافیا، واحد نور دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران

^۳هیأت علمی گروه میراث طبیعی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
پژوهشگران بسیاری سعی نموده‌اند که مدل‌هایی برای ارزیابی حساسیت خطر زمین لغزش ارائه داده و به عبارت دیگر، به نقشه پهنه‌بندی لغزش‌ها برسند که بیش‌تر بر اساس روش استقرایی و مدل‌سازی‌های کمی و آماری بوده است. به این‌صورت که عوامل مختلف مؤثر در وقوع زمین لغزش را بررسی نموده و سپس چگونگی تأثیر آن‌ها را در پراکندگی لغزش‌ها تحلیل کرده‌اند. حوضه آبخیز گلندرود با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، تکتونیکی، شرایط اقلیمی، هیدرولوژیکی، توپوگرافی و پوشش گیاهی فقیر، دارای پتانسیل لغزشی بوده و دخالت غیراصولی انسان در آن باعث وقوع و تشدید حرکات توده‌ای می‌شود. در پژوهش حاضر با رویکردی توصیفی-تحلیلی و پیمایشی، به منظور تهیه نقشه حساسیت به ناپایداری دامنه‌ای و لغزش‌های حوضه مطالعاتی از ۱۱ فاکتور مؤثر در ناپایداری دامنه‌ای و الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شده است. این فاکتورها عبارت است از: شیب، جهت دامنه، ارتفاع، فاصله از جاده، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، مجموع بارندگی سالانه، میانگین دمای سالانه، کاربری زمین، زمین‌شناسی و انحناء دامنه‌ها. تعداد ۳۵۲ نقطه لغزشی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی مشخص شدند که از این تعداد، ۷۰ درصد برای آموزش مدل و ۳۰ درصد باقیمانده آن برای اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه، از کدنویسی الگوریتم جنگل تصادفی در محیط MATLAB R2020a برای شناسایی پهنه‌های مستعد به حرکات لغزشی استفاده شد. با توجه به نقشه خطرپذیری زمین لغزش در حوضه آبخیز گلندرود، بیش از ۳۰ درصد منطقه	تاریخچه مقاله تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۶/۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱ کلمات کلیدی: لغزش زمین ارزیابی حساسیت لغزش زمین الگوریتم جنگل تصادفی حوزه آبخیز گلندرود

در کلاس خطر بسیار زیاد، ۱۹ درصد در کلاس خطر زیاد، ۱۳ درصد در کلاس خطر متوسط، ۱۹ درصد در کلاس خطر کم و ۱۶ درصد از حوضه مطالعاتی نیز در کلاس خطر زمین لغزش خیلی کم قرار دارد. اولویت بندی متغیرهای مؤثر بیان گر آن است که بیش ترین وزن با رتبه معیار ۰/۹۸ مربوط به ارتفاع می باشد. تحلیل مفهوم کاتنا که بیان گر ارتباط میان الگو و چشم انداز خاک بر روی شیب دامنه با توپوگرافی است و منجر به تغییر پذیری خصوصیات خاک و به دنبال آن تغییر در پوشش گیاهی می شود، می تواند توجیه ارتباط یا اثر گذاری عامل ارتفاع بر حرکات لغزشی منطقه مطالعاتی باشد. مطالعه دقیق موضوع دلایل وقوع حرکت توده ای در منطقه گلندرود و راه های پیش گیری از خسارات ناشی از آن توسط متخصصین ذی ربط، مهم ترین اقدام برای کاهش خسارت های ناشی از آن است.

مقدمه

یکی از شایع ترین پدیده های طبیعی که عموماً در نقاط کوهستانی جهان رخ می دهد، زمین لغزش است که در بسیاری موارد منجر به خسارات مالی و جانی گشته و به عنوان بلای طبیعی شناخته می شود. نظارت مستمر تغییرات سطح زمین و شناسایی مناطق مستعد حرکات دامنه ای، از جمله زمین لغزش، خصوصاً در محدوده سکونتگاه های انسانی و زیرساخت های ارتباطی مانند جاده و خطوط ریلی، از مؤثرترین عوامل کاهش تلفات جانی و مالی مخاطرات طبیعی مثل زمین لغزش می باشد (Abedini & Mohammadzadeh Shisha Garan, 2022; Aleotti & Chowdhury, 1999; Derafshi, Motevalli, Hosseinzadeh & Esmaeili, 2013; Motevalli, Hosseinzadeh, Esmaeili & Derafshi, 2015).

زمین لغزش ها یکی از انواع ناپایداری دامنه ای هستند که هر سال خسارت مالی و تلفات جانی فراوانی بر زندگی انسان ها وارد می کنند. زمین لغزش به عنوان یکی از فرآیندهای محیط طبیعی، دارای مکانیزمی پیچیده بوده و به عوامل بسیاری وابسته می باشد. این عوامل که درونی و بیرونی هستند، می توانند در وقوع یا عدم وقوع ناپایداری مؤثر باشند. بررسی و ارزیابی خطر زمین لغزش، همکاری گوناگون رشته های علمی چون ژئومورفولوژی، زمین شناسی، سنجش از دور، دینامیک سیالات و ویژگی های اجتماعی را مورد تأکید قرار می دهد و همچنین لزوم درک فرایند فیزیکی حاکم بر لغزش و بالا بردن سطح آگاهی عمومی از خطرات لغزش و مدیریت صحیح برای کاهش خطر را گوش زد می کند (Karam & Tourani, 2013; Motevalli et al., 2015).

با توسعه سریع ساخت و سازهای مهندسی و افزایش فراوانی رخدادهای شدید آب و هوایی، خطر زمین لغزش شدیدتر می شود و به طور بالقوه باعث تلفات و از دست دادن مقادیر زیادی از اموال در سراسر جهان می شود (Zeng et al., 2023). زمین لغزش می تواند اثرات اجتماعی - اقتصادی و زیست محیطی قابل توجهی داشته باشد و منجر به تلفات، جراحات و آسیب به اموال و زیرساخت ها شود (Zhao & Lu, 2018). پیش گیری از وقوع چنین مخاطره ای غیر ممکن است؛ با این حال، کاهش خطرات آن از طریق برنامه ریزی آگاهانه، امکان پذیر است. در خصوص توزیع و پراکندگی لغزش ها و علل وقوع آن ها، مطالعات جامعی، هم در سطح بین المللی و هم در

سطح داخلی، صورت گرفته است. در این زمینه مطالعاتی، پژوهشگران بسیاری سعی نموده‌اند که مدل‌هایی برای ارزیابی حساسیت خطر این پدیده ارائه داده و به عبارت دیگر، به نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمی لغزش‌ها برسند که بیش‌تر بر اساس روش استقرایی و مدل‌سازی‌های کمی و آماری بوده است. به این‌صورت که عوامل مختلف مؤثر در وقوع زمین لغزش را بررسی نموده و سپس چگونگی تأثیر آن‌ها را در پراکندگی لغزش‌ها تحلیل کرده‌اند. با تطبیق نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با نقشه‌های کاربری اراضی می‌توان مناطق تحت خطر شامل شهرها، روستاها، پل‌ها، کارخانه‌ها، و غیره را شناسایی کرد تا اقدامات لازم برای حفاظت از این سرمایه‌ها انجام پذیرد. سه رویکرد اصلی در ارزیابی خطر زمین لغزش به صورت کیفی، نیمه کمی و کمی وجود دارد؛ روش‌های کمی بر پایه منطق ریاضی از همبستگی بین فاکتورهای مؤثر در وقوع زمین لغزش می‌باشند که شامل رگرسیون تحلیلی دو متغیره، چند متغیره و لجستیک یا منطق فازی و شبکه مصنوعی هستند (Karimi Sangchini, Awnagh & Saedaldin, 2012).

تاکنون تکنیک‌های متعددی مانند استفاده از سیستم تعیین موقعیت جهانی^۱، روش ژئودزی^۲ و تاکنومتری^۳، دوربین‌های نقشه‌برداری، اسکن لیزری و لیدار^۴ برای پایش تغییرات سطح زمین ارائه شده است (Hooper, 2022; Zebker, Segall & Kampes, 2004; Abedini & Mohammadzadeh Shisha garan, 2022). روش‌های کمی و کیفی زیادی هم برای انجام فرآیند ایجاد نقشه حساسیت زمین لغزش، از جمله تحلیل سلسله مراتبی^۵، آماری دو متغیره، رگرسیون لجستیک^۶، منطق فازی^۷ و الگوریتم‌های یادگیری ماشین^۸، به کار گرفته شده است (Abedini & Mohammadzadeh Shisha garan, 2022; Talebi, Goudarzi & Pourghasemi, 2018; Metternicht, Hurni & Gogu, 2005).

تکنیک‌های داده‌کاوی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، همانند الگوریتم جنگل تصادفی^۹، به دلیل دقت بالاتر نسبت به مدل‌های پیش گفته، از جمله روش‌هایی است که در سال‌های اخیر به منظور ارزیابی خطر زمین لغزش مورد استفاده قرار گرفته است (Youssef, Pourghasemi, Pourtaghi & Al-Katheeri, 2015; Rahmati, 2018; Talebi et al., 2018; Pourghasemi & Melesse, 2016). مدل‌های یادگیری ماشین به لحاظ به کارگیری الگوریتم‌های تخمین توزیع، طبیعت داده‌محور و تکرار بالای فرآیند مدل‌سازی، توانایی بالایی در شناسایی رفتار وقوع پدیده زمین لغزش داشته و در پژوهش‌های متعددی، برتری نسبی خود را نسبت به مدل‌های آماری دو متغیره و چند متغیره اثبات نموده‌اند (Rott, Scheuchl, Siegel & Grasemann, 1999; Berardino, Fornaro, 2002; Lanari & Sansosti, 2002; Mora, Mallorqui & Broquetas, 2003; Hilley, Bürgmann, Ferretti, Novali & Rocca, 2004; Strozzi et al., 2005; Lauknes et al., 2010; Intrieri, Gigli, Mugnai, Fanti & Casagli, 2010).

1 Global Position System

2 Geodesy

3 Tacheometry

4 LiDAR

5 AHP

6 Logistic Regression

7 Fuzzy Logic

8 Machine Learning

9 Random Forest

2012; Akbarimehr, Motagh & Haghshenas-Haghighi, 2013; Carlà, Intrieri, Di Traglia & Casagli, 2016; Carlà, Intrieri, Farina & Casagli, 2017, Di Martitire et al., 2018; Sabeti et al., 2019; Abedini & Mohammadzadeh Shisha garan, 2022).

الگوریتم جنگل تصادفی یکی از روش‌های مدل‌سازی درخت تصمیم است که از تلفیق نتیجه‌های به‌دست آمده از درخت‌های مختلف، ارتباط میان رخداد زمین‌لغزش و عامل‌های محیطی را برآورد می‌کند. از طرف دیگر، این روش داده‌کاوی عامل‌های مؤثر را اولویت‌بندی و اهمیت آن‌ها را تعیین می‌کند. دقت این روش در مقایسه با مدل‌های آماری و سنتی که نیاز به برخی فرضیه‌ها از جمله به‌هنگار بودن داده‌ها و طبقه‌بندی عامل‌ها دارند، بسیار بیش‌تر است (Naghahi & Pourghasemi, 2015; Rahmati et al., 2016; Garosi et al., 2018; Arabameri, Pradhan, Pourghasemi, Rezaei & Kerle, 2018; Amiri, Pourghasemi, Ghanbariana & Afzali, 2019; Davoudi Moghaddam, Pourghasemi & Rahmati, 2019).

شناخت دقیق مکانیسم و نحوه عملکرد پارامترهای مؤثر بر گستره و ویژگی‌های فیزیکی زمین‌لغزش‌های حوضه آبخیز گلندرد بسیار حائز اهمیت است. با توجه به نتایج پژوهش‌های بررسی شده و اهمیت موضوع تحلیلی بر میزان اثرگذاری عوامل وقوع زمین‌لغزش این حوضه، از الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شده است. شناسایی پهنه‌های مستعد به حرکات لغزشی در حوضه مورد بررسی، می‌تواند گامی مؤثر در راستای کاهش اثرات مخرب وقوع این پدیده باشد و نقشه پهنه‌بندی حساسیت، راهنمایی برای مدیریت جامع این مخاطره طبیعی خواهد بود.

مواد و روش‌ها

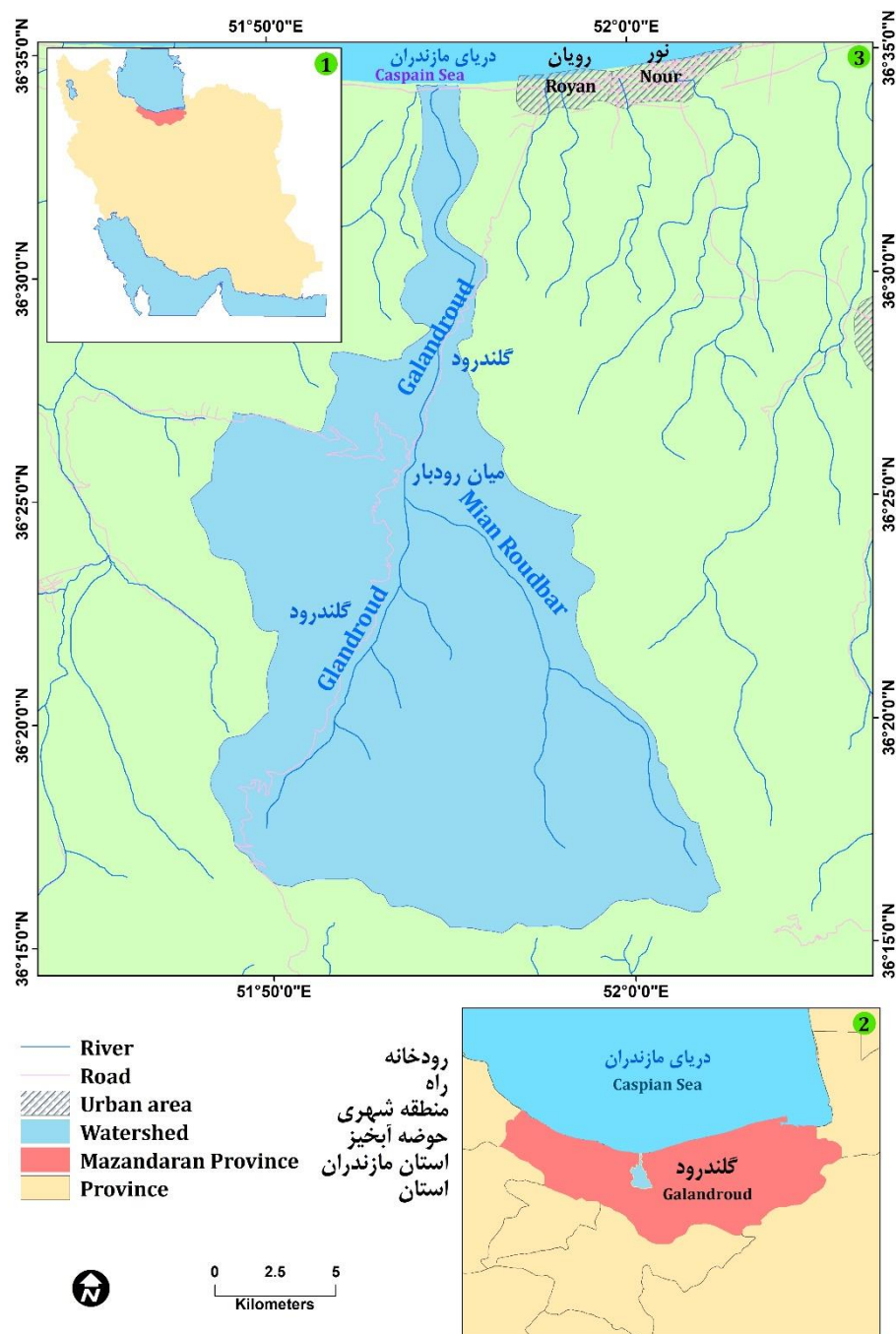
منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در استان مازندران و جنوب شهرستان نور، حوضه آبخیز گلندرد، در بخش مرکزی سلسله جبال البرز قرار دارد که بخشی از حوضه بزرگ آبخیز هراز می‌باشد. مساحت منطقه مورد مطالعه ۳۵۱ کیلومتر مربع است و دارای مختصات عرض شمالی ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۵ دقیقه و طول شرقی ۵۱ درجه و ۴۷ دقیقه و ۴۷ ثانیه تا ۵۲ درجه و ۰۲ دقیقه و ۳۰ ثانیه قرار گرفته است (شکل ۱). در بالادست منطقه مورد مطالعه روستاهای کپ، کالج، دونکوه، نشو، پس‌پرس، خورتاب رودبار، هلوپشته، بومک، لوس و ونگزیار قرار گرفته‌اند. ارتفاع بیشینه و کمینه حوضه به‌ترتیب ۳۵۷۳ متر و ۶۰ متر است. ریزش‌های جوی در منطقه، بیش‌تر تحت تأثیر توده‌های هوای پرفشار سیبری و مدیترانه‌ای است که از نواحی شمال و شمال شرق و یا سمت غرب و شمال غرب، منطقه را مورد تهاجم قرار می‌دهند (Alijani, 2003).

اقلیم ناحیه به روش آمبرژه از نوع مرطوب سرد است. میزان ریزش‌های جوی سالیانه منطقه مورد مطالعه بر اساس دو ایستگاه هواشناسی نوشهر و چمستان، به‌طور متوسط حدود ۶۵۱ میلی‌متر بوده است که بیش‌ترین مقادیر آن به آبان ماه و فصل پاییز و کم‌ترین مقادیر آن نیز به تیر ماه و فصل تابستان تعلق دارد. میانگین بارش حوضه با استفاده از منحنی‌های هم‌بارش ۵۱۰ میلی‌متر محاسبه شده که در قسمت‌های شمالی حوضه بیش از ۹۰۰ میلی‌متر و در قسمت‌های جنوبی آن به ۲۵۰ میلی‌متر می‌رسد. به‌لحاظ زمین‌شناسی، چینه‌شناسی

سازندهای حوضه عمدتاً رسوبی بوده و از دوران مزوزوئیک (تریاس) تا سنوزوئیک (نئوژن- کواترن) در آن وجود دارد. تقریباً ۷۶ درصد مساحت حوضه از سازند شمشک (ژوراسیک) تشکیل شده است که لیتولوژی آن از شیل، ماسه-سنگ، رگه‌های زغالی و کنگلومرا همراه با آبرفت‌های رودخانه‌ای است. بقیه مساحت حوضه به‌ترتیب از سنگ‌های دوران کرتاسه، تریاس و سنوزوئیک تشکیل شده و شامل انواع سنگ آهک، دولومیت، ماسه-سنگ، شیل و مارن می‌شود. از لحاظ کاربری اراضی، بخش اعظم منطقه مورد مطالعه را ناحیه جنگلی و مرتعی تشکیل داده و دامداری گاو و گوسفند در سراسر منطقه رایج است.

از کل مساحت حوضه آبریز گلندرود، تقریباً ۵۵ درصد زیر پوشش جنگل، ۳۵ درصد تحت پوشش مرتع و ۱۰ درصد در محدوده کاربری‌های انسانی (آبادی، اراضی کشاورزی و ...) قرار دارد. به‌لحاظ خاک‌شناسی بخش اعظم منطقه دارای بافت رسی- سیلتی و رسی است. نوع سازند زمین‌شناسی یکی از انواع عوامل طبیعی مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش است و در منطقه مورد مطالعه، سازند شمشک حاوی خاک‌های شیل بوده که کانی‌های حساس رسی چون مونت موریلونیت و سایر کانی‌های موجود در خاک‌های رسی، می‌توانند با جذب آب متورم شده و پتانسیل وقوع زمین‌لغزش را افزایش دهند. وجود دو گسل در ضلع شمالی و جنوبی سازنده شمشک، گاهی با حرکات خفیف خود، پتانسیل وقوع زمین‌لغزش را افزایش می‌دهند. آب زیرزمینی، توپوگرافی (شامل ارتفاع، میزان شیب و جهت دامنه)، یخبندان، بارش باران و برف، نوع پوشش گیاهی و رودخانه گلندرود هم در وقوع زمین‌لغزش اثرگذار است. علاوه بر عوامل طبیعی، فعالیت‌های انسانی در منطقه گلندرود نیز عامل مهمی در وقوع زمین‌لغزش است؛ فعالیت‌هایی همچون احداث شهرک معدن گلندرود، افزایش ساخت و ساز در آبادی گلندرود، تخریب پوشش گیاهی در منطقه، نوسان سطح آب زیرزمینی، جاده‌سازی به روش نامناسب، فعالیت‌های معدنی، تغییر کاربری اراضی (شکل ۲).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز گلندرود در استان مازندران

Fig. 1. Geographical location of Glandroud watershed in Mazandaran Province



شکل ۲- وقوع زمین لغزش در حوضه آبخیز گلندرود با مکانیسم چرخشی پسرونده

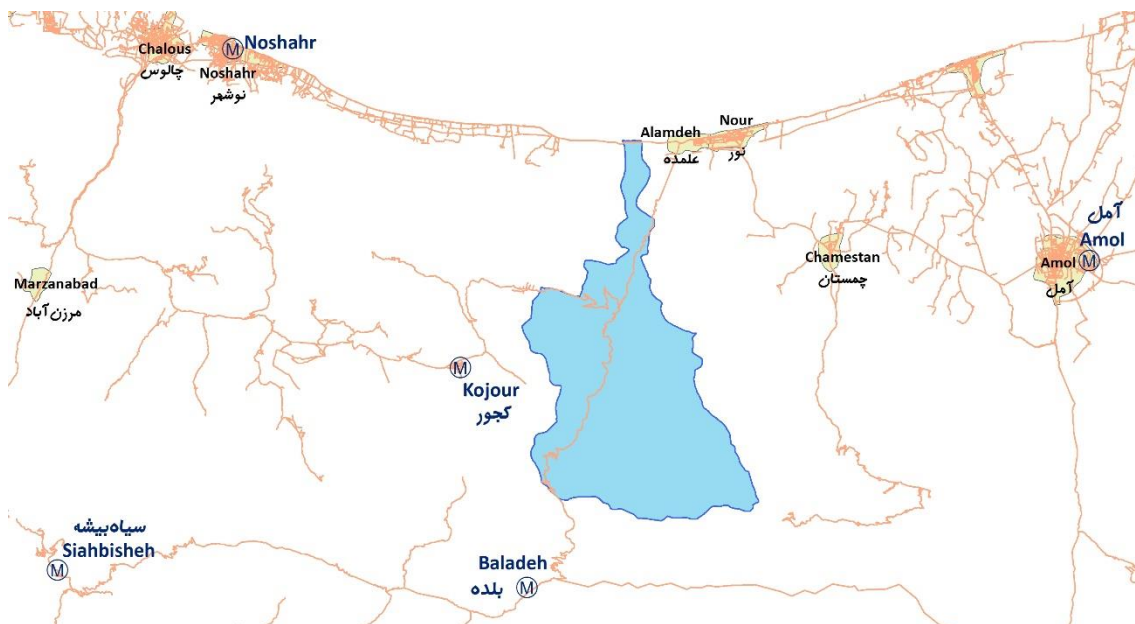
Fig. 2. Occurrence of landslides in Glandrood with a retrogressive rotational mechanism

روش انجام پژوهش

روش شناسی

پژوهش حاضر با رویکرد توصیفی-تحلیلی پیمایشی، به منظور تهیه نقشه حساسیت به ناپایداری دامنه‌ای و زمین لغزش‌ها انجام شده که در آن از ۱۱ فاکتور مؤثر در ناپایداری دامنه‌ای استفاده شده است. این فاکتورها عبارت است از: شیب، جهت دامنه، ارتفاع، فاصله از جاده، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، مجموع بارندگی سالانه، میانگین دمای سالانه، کاربری زمین، زمین شناسی و انحنا دامنه‌ها. برای تهیه این لایه‌ها از داده‌های اولیه از جمله نقشه توپوگرافی ۱:۵۰,۰۰۰ شیت ۶۴۶۳ نور و برای تهیه نقشه‌های زمین شناسی و نقشه گسل‌ها از نقشه‌های زمین شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰ شیت آمل و ۱:۱۰۰,۰۰۰ شیت‌های نور-آمل انتشار یافته توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور استفاده شده است. از مدل رقومی ارتفاعی ASTER با تفکیک زمینی ۳۰ متر برای تهیه فاکتورهایی چون ارتفاع، شیب، جهت دامنه، و انحنا دامنه‌ها استفاده شده است. در ابتدا، نقاط لغزشی با تعداد ۳۵۲ نقطه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و Google Earth و بازدیدهای میدانی مشخص شدند. از این تعداد، ۷۰ درصد نقاط برای آموزش مدل و ۳۰ درصد باقیمانده آن برای اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفته است. رقومی سازی نقشه‌های پایه و توابع با استفاده از نرم افزار ArcGIS 10.7 انجام گرفته است. از تابع فاصله اقلیدوسی برای تهیه و آماده سازی فاکتورهای زمین شناسی، فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از آبراهه استفاده شده است. برای تهیه نقشه مجموع بارندگی سالانه از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه (نوشهر، سیاه‌بیشه، بلده، کجور و آمل) در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳، با استفاده از توابع ریاضی درون‌یابی استفاده شده است (شکل ۳). فاکتور کاربری اراضی با استفاده از روش طبقه‌بندی

نظارت شده و الگوریتم حداکثر احتمال (میزان دقت کل ۰/۸۲ درصد و ضریب کاپای ۰/۸۹) از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 7 (۲۰۲۰) و آرشیو Google Earth و همچنین لایه اطلاعاتی کاربری اراضی استان مازندران (اداره کل منابع طبیعی) آماده شده است.



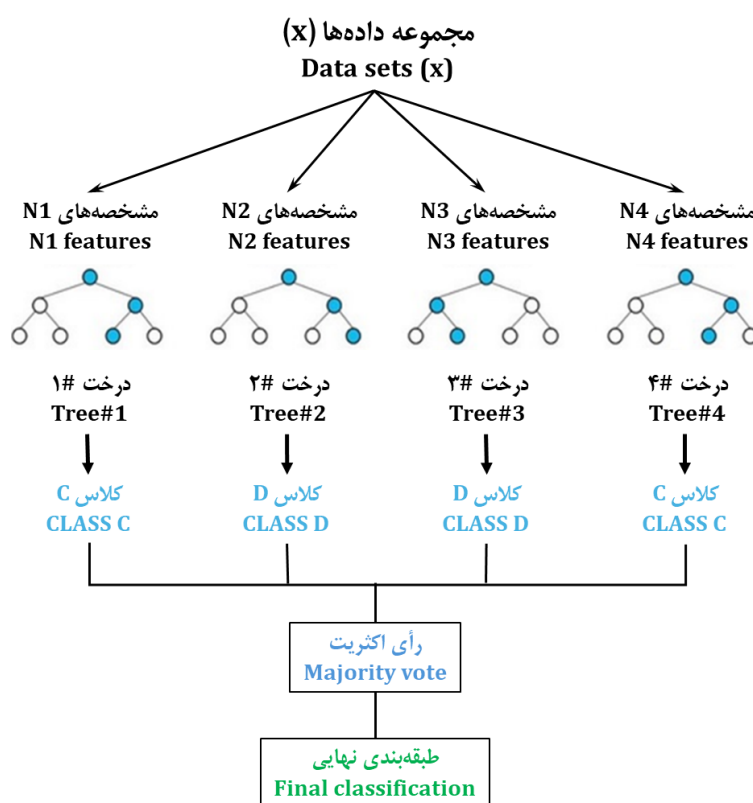
شکل ۳- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک استفاده شده در این پژوهش

Fig. 3. Geographical location of the synoptic stations used in this study

الگوریتم جنگل تصادفی (RF)

این الگوریتم در واقع یک الحاقی از مدل درخت رگرسیون و طبقه‌بندی است که اولین بار توسط Berman در سال ۲۰۰۱ ایجاد و توسعه داده شده است. جنگل تصادفی یک نوع مدرن از درخت پایه است که شامل انبوهی از درخت‌های کلاس‌بندی و رگرسیون می‌باشد (Ebrahimkhani, Afzali & Shokoohi, 2011). الگوریتم جنگل تصادفی برای مشخص کردن این است که هر متغیر چه نقشی در پیش‌بینی پاسخ دارد. جنگل تصادفی شامل سه پارامتر تعریف شده توسط کاربر است: (۱) تعداد متغیرهای مورد استفاده در ساخت هر درخت که قدرت هر درخت مستقل را بیان می‌کند؛ (۲) تعداد درختان در جنگل تصادفی و (۳) حداقل تعداد گره‌های انتهایی (Peters, Verhoest, Samson, Boeckx & De Baets, 2008). قدرت پیش‌بینی جنگل تصادفی با افزایش قدرت درختان مستقل و کاهش همبستگی بین آن‌ها افزایش می‌یابد (Lieb, Glaser & Huwe, 2012). الگوریتم جنگل تصادفی از تمام داده‌های موجود برای رویاندن درخت استفاده نمی‌کند؛ بلکه از ۶۶ درصد داده‌ها استفاده می‌کند که به آن نمونه Bootstrap گفته می‌شود این الگوریتم، برای تکمیل ایده‌های جنگل تصادفی و

افزایش تنوع و پراکندگی در آن طراحی شده است. ۳۳ درصد از داده‌های باقیمانده نیز برای ارزیابی درخت برآزش شده، استفاده می‌شود. این فرآیند چندین بار تکرار و میانگین تمام مقادیر پیش‌بینی شده، به‌عنوان پیش‌بینی نهایی الگوریتم استفاده می‌شود. تعداد درختان بهینه به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که اولاً کم‌ترین خطای آموزش در مدل‌سازی به‌دست آید؛ ثانیاً تعداد درختان نباید آن قدر زیاد شود که تجزیه و تحلیل متغیرها نیازمند زمان و محاسبات کامپیوتری زیادی باشد (Talebi et al., 2018). یکی از پارامترهای اصلی در جریان مدل جنگل تصادفی، پیش‌بینی کننده K (متغیر مستقل) در هر گره جهت پیش‌بینی وابسته (پاسخ) است. مجموعه داده‌ها با D نمایش داده می‌شود (رابطه ۱) و B درخت تصادفی با ایجاد B داده جدید از D ایجاد می‌شود. N نمونه را با جایگزینی از داده D انتخاب می‌کند و این نمونه‌ها را در مجموعه داده D_b قرار می‌دهد (رابطه ۱). از آنجا که نمونه‌گیری با جایگزینی صورت می‌گیرد، یک نمونه ممکن است چندین بار انتخاب شود (شکل ۴).



شکل ۴- نمودار مراحل انتخاب درخت‌ها در مدل الگوریتم جنگل تصادفی

Fig. 4. Chart of tree selection stages in the random forest algorithm model

$$D = (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n) \quad \text{رابطه (۱)}$$

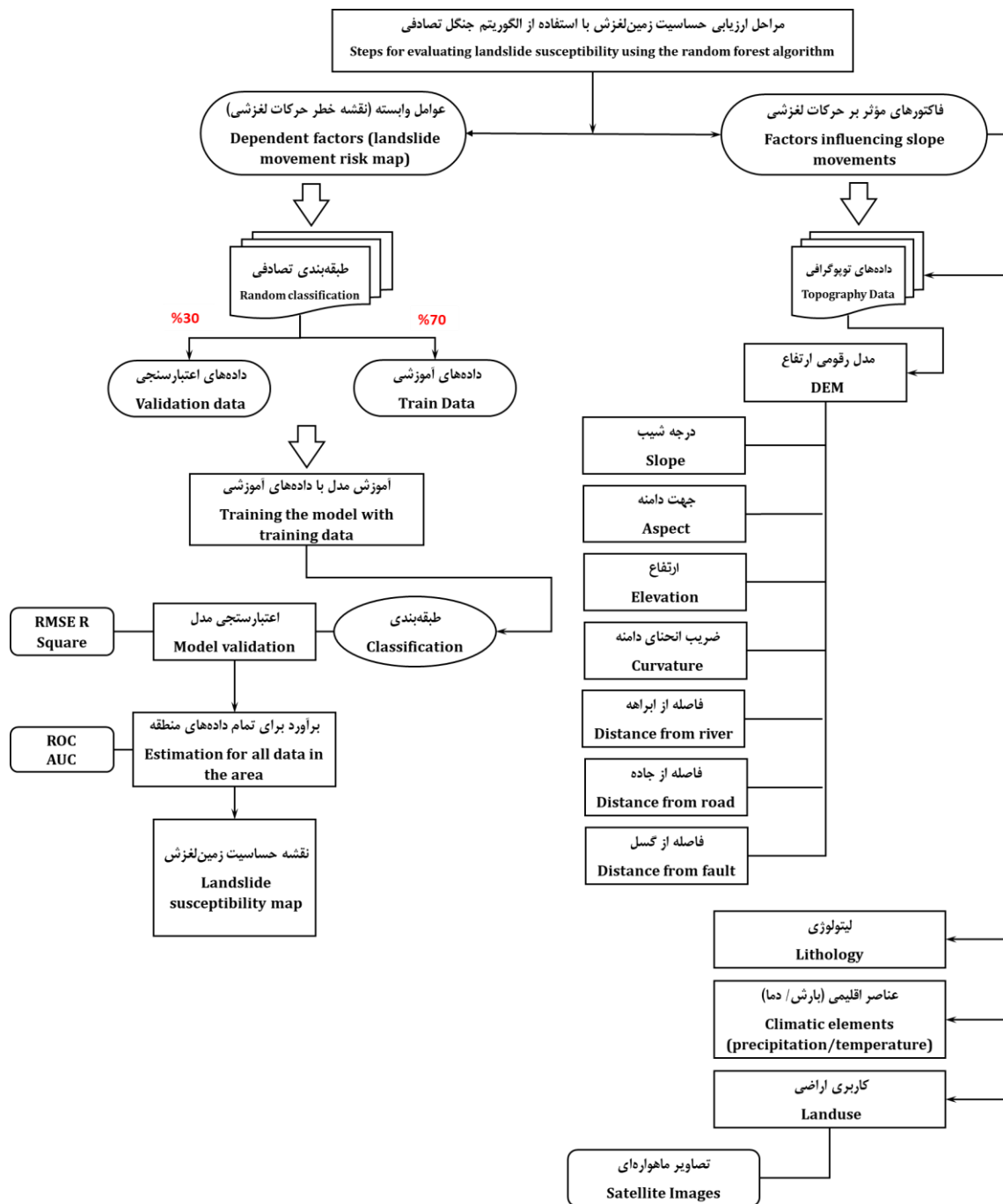
از جمله مزایای این الگوریتم می‌توان به مواردی اشاره نمود که از مهم‌ترین آن‌ها جلوگیری از بیش برآزش مدل می‌باشد. استفاده از میانگین کاهشی دقت در مقایسه با شاخص اهمیت جینی در تعیین اولویت عوامل مؤثر، بهتر و پایدارتر است؛ به‌ویژه در شرایطی که بین فاکتورهای محیطی ارتباط وجود دارد (Nicodemus, 2011). بر این اساس، در پژوهش حاضر، از الگوریتم جنگل تصادفی برای ارزیابی حساسیت زمین لغزش در حوضه آبخیز گلندرود استفاده شده است.

برای این کار، پس از تهیه و آماده‌سازی ۱۱ فاکتور مستقل و داده‌های مربوط به حرکات لغزشی، از کد نویسی الگوریتم جنگل تصادفی در محیط MATLAB R2020a استفاده شده است. این فرآیند شامل پیش‌پردازش داده‌ها، پیکربندی پارامترهای الگوریتم، آموزش مدل و ارزیابی عملکرد آن است. هرچند ساختار داده‌کاوی، به منبع داده‌ها مرتبط می‌گردد، اما تا قبل از پردازش، شامل هیچ داده‌ای نمی‌شود و در هنگام پردازش نمودن ساختار داده‌کاوری، اطلاعات گردآوری شده برای آنالیز آماده می‌شود. پیش از پردازش ساختار و مدل، مدل داده‌کاوی نیز تنها یک ظرفیت خالی محسوب می‌شود که مشخص‌کننده ستون‌های مربوط به داده‌های ورودی یا صفات پیش‌بینی شده و پارامترهایی می‌باشد که نحوه پردازش داده‌ها توسط الگوریتم را معین می‌کند. در رابطه نوشته شده، ابتدا مدل بهینه با میزان خطا و عملکرد مناسب و قابل قبولی طراحی شده و پس از برآورد، برای تمامی محدوده انجام گرفته است. با توجه به شکل ۵ در روند مدل‌سازی جنگل تصادفی، پس از ساخت و آموزش مدل از دو مرحله ارزیابی استفاده شده است. بخش اول مربوط به مرحله ساخت بوده که با معیارهای مجذور میانگین مربعات خطای اندازه‌گیری، تهیه و ضریب تعیین مشخص گردیده است؛ بخش دوم مربوط به ارزیابی نقشه نهایی خطرپذیری زمین لغزش با استفاده از ۳۰ درصد داده‌های اعتبارسنجی است که در ابتدای کار کنار گذاشته شده بود.

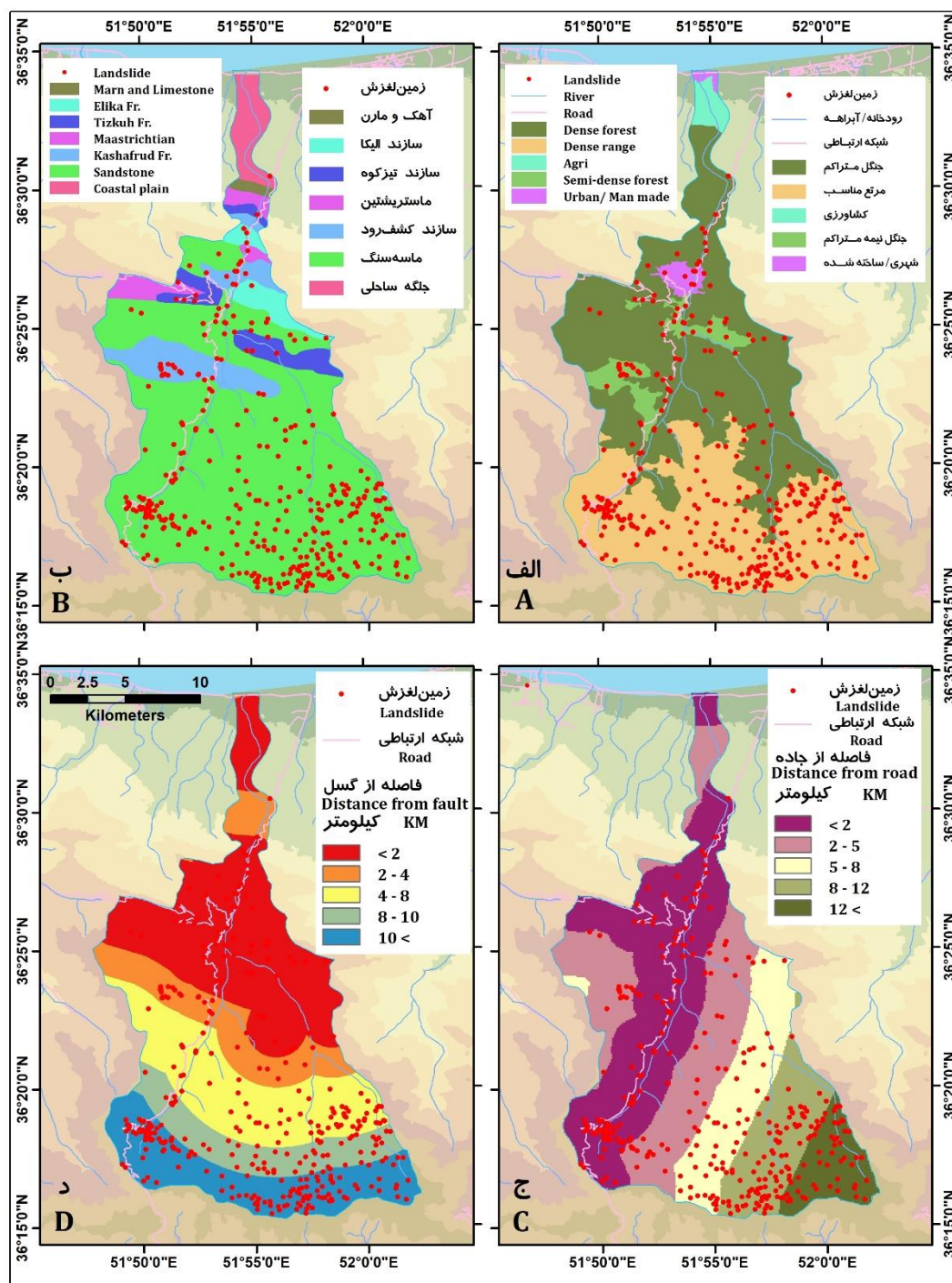
به‌منظور دستیابی به مدل منطقی و مناسب برای حوضه آبریز گلندرود، از منحنی ROC استفاده شده است. منحنی ROC از کامل‌ترین روش‌ها در ارائه خصوصیت تعیین، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌ها می‌باشد که میزان دقت مدل را به‌صورت کمی برآورد می‌کند.

در این ارزیابی به روش منحنی ROC، هر چه سطح منحنی بیش‌تر باشد، دقت مدل بیش‌تر است که میزان آن بین ۰/۵ تا ۱ در تغییر است. به‌طور کلی، تقسیم‌بندی ۰/۹-۱ عالی، ۰/۸-۰/۹ خیلی خوب، ۰/۷-۰/۸ خوب، ۰/۶-۰/۷ متوسط و ۰/۵ تا ۰/۶ ضعیف را برای آن ارائه کرده‌اند. برای رسم منحنی ROC در الگوریتم جنگل تصادفی، قبل از کلاس بندی نقشه وزن نهایی، نقاط لغزشی را که برای ارزیابی در نظر گرفته روی نقشه قرار داده و وزنی که در هر نقطه بدست آمده را (منظور کدهای ۱ و ۰) به نرم‌افزار MATLAB R2020a انتقال داده و با استفاده از کد دستوری، سطح زیر منحنی دقت مدل به‌دست آمده است. منحنی عملکرد نسبی ROC یکی از مفیدترین و کارآمدترین روش‌ها در پیش‌بینی و تعیین دقت مدل‌سازی می‌باشد؛ در حقیقت یک نمایش گرافیکی از تضمین درست وقوع یا عدم وقوع زمین لغزش‌ها محسوب می‌شود. سطح زیر منحنی بیان‌گر مقدار

پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده و عدم وقوع رخداد آن است. چنانچه مدلی نتواند وقوع پدیده‌ای را بهتر از دیدگاه احتمالی و یا تصادفی تخمین زند، مقدار زیر نمودار ۰/۵ خواهد بود که کم‌ترین دقت را دارد. در حالی که سطح نمودار برابر با ۱ باشد، مدل تهیه شده بیش‌ترین دقت را داراست. شکل‌های ۶، ۷ و ۸ نقشه‌های عوامل مؤثر در ارزیابی حساسیت خطر حرکات لغزشی و مدل‌سازی آن را نشان می‌دهد.



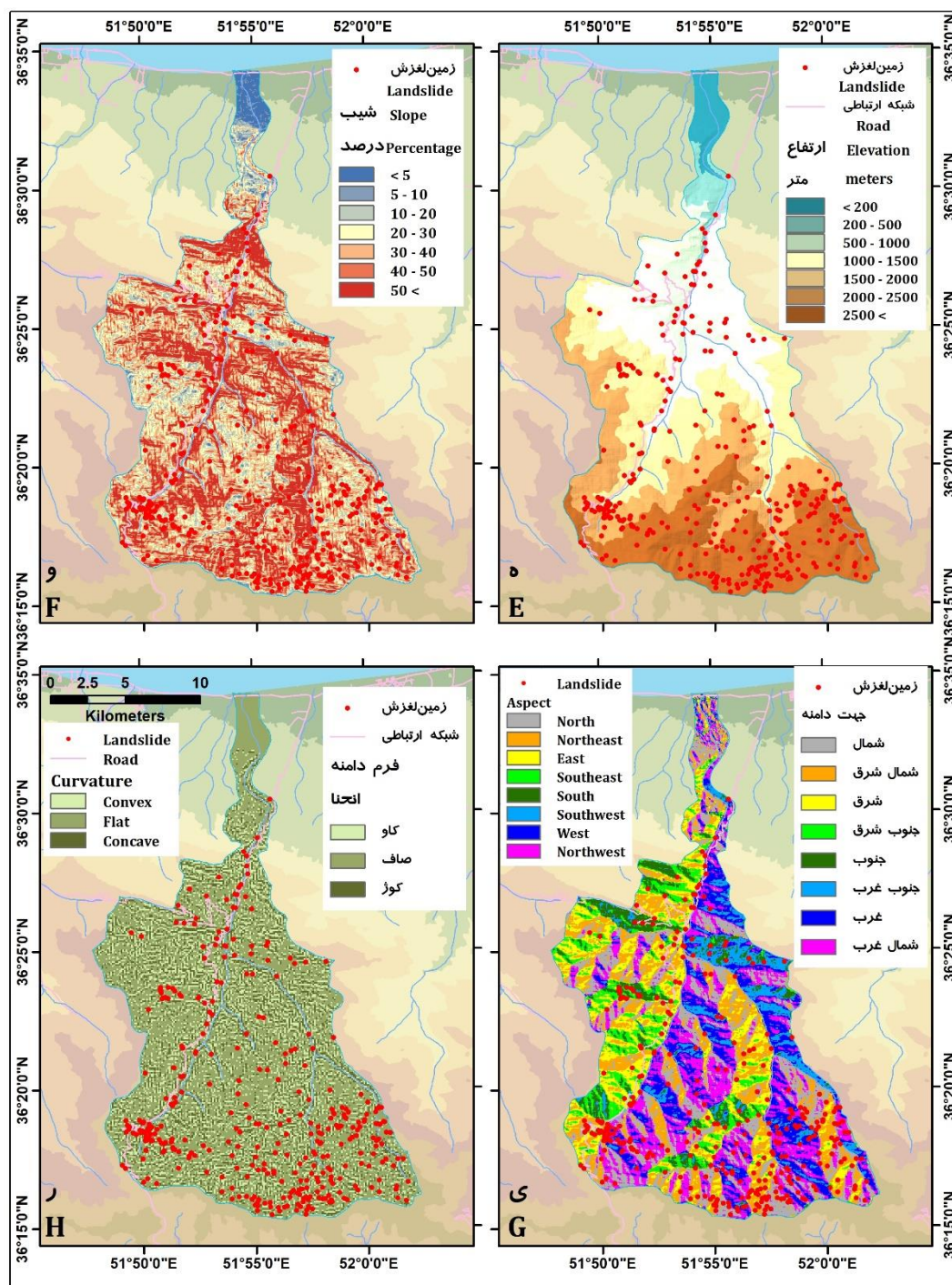
شکل ۵- نمودار فرایند پژوهش: مدل‌سازی و ارزیابی حساسیت زمین لغزش در حوضه گلندرود
Fig. 5. Research process diagram: Modeling and evaluating landslide susceptibility in Glandrood watershed



شکل ۶- نقشه عوامل مؤثر در ارزیابی حساسیت خطر حرکات لغزشی و مدل سازی آن در حوضه آبخیز

گلندرود؛ الف) کاربری اراضی، ب) زمین شناسی، ج) فاصله از جاده، د) فاصله از گسل

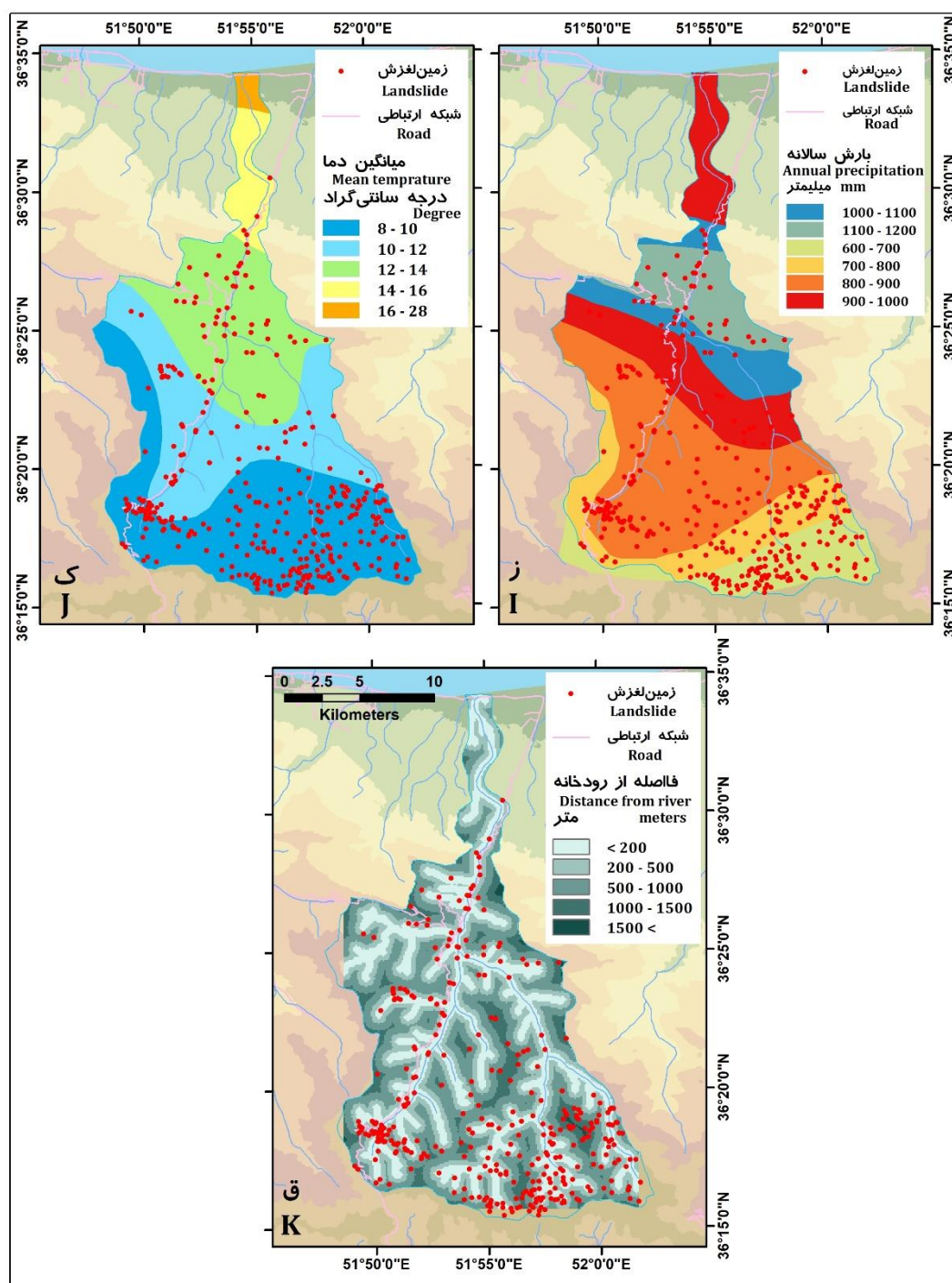
Fig. 6. Map of factors affecting landslide hazard susceptibility assessment and modeling in Glandrood watershed; A) Landuse, B) Geology, C) Distance from road, D) Distance from fault



شکل ۷- نقشه عوامل مؤثر در ارزیابی حساسیت خطر حرکات لغزشی و مدل سازی آن در حوضه آبخیز

گلندروود؛ د) ارتفاع، ه) شیب، و) جهت دامنه، ر) فرم دامنه

Fig. 7. Map of factors affecting landslide hazard susceptibility assessment and modeling in Glandrood watershed; E) Elevation, F) Slope, G) Aspect, H) Range form

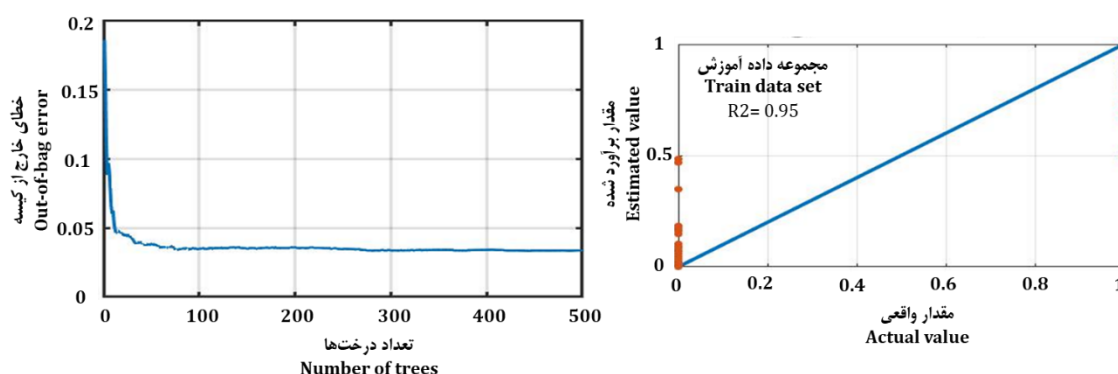


شکل ۸- نقشه عوامل مؤثر در ارزیابی حساسیت خطر حرکات لغزشی و مدل سازی آن در حوضه آبخیز گلندرود: ز) بارش سالیانه، ک) میانگین دما، ق) فاصله از رودخانه

Fig. 8. Map of factors affecting landslide hazard susceptibility assessment and modeling in Glandrood watershed; h) Annual precipitation, i) Average temperature, j) Distance from river

نتایج و بحث

زمین لغزش‌ها معمولاً توسط اثرات ترکیبی داخلی با اشاره به ویژگی‌های ذاتی شیب طبیعی و عوامل محرک خارجی از جمله بارندگی مداوم یا ذوب یخچال‌ها و زمین لرزه‌های ناگهانی و همچنین عامل انسانی ایجاد می‌شوند (Pirasteh & Li, 2017). به‌طور کلی، تعیین حساسیت زمین لغزش و پیش‌بینی احتمال وقوع آن، عمدتاً با در نظر گرفتن عوامل داخلی انجام می‌شود (Jaboyedoff et al., 2018). در این پژوهش، برای ارزیابی حساسیت وقوع زمین لغزش حوضه آبخیز گلندرد، از ۱۱ فاکتور اثرگذار و الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شد. مهم‌ترین نکته در اجرای مدل‌سازی، اعتبارسنجی و آموزش آن است. در اجرای مدل جنگل تصادفی، در تعیین درخت‌ها برای آموزش و اعتبارسنجی، خطای خارج از کیسه^۱، اهمیت بسیار زیادی دارد. برای تعیین تعداد مناسب درخت‌ها، با استفاده از معیار میانگین مربعات خطا (MSE)، ابتدا چند مقدار اولیه برای تعداد درخت‌ها تعیین و سپس مدل اجرا گردید. با بررسی میزان میانگین خطا و معیار ضریب تعیین برای آموزش، مدل بهینه با کم‌ترین میزان خطا طراحی شد. مدل به‌دست آمده با مقدار ضریب تعیین ۰/۹۴ و مجذور میانگین مربعات خطا ۰/۱۷ برای مرحله آموزش به‌دست آمد. نتایج آموزش مدل در شکل ۹ آورده شده است.



شکل ۹- ضریب تعیین رگرسیون (راست) و کاهش خطایی آموزش در ازای درختان (چپ)

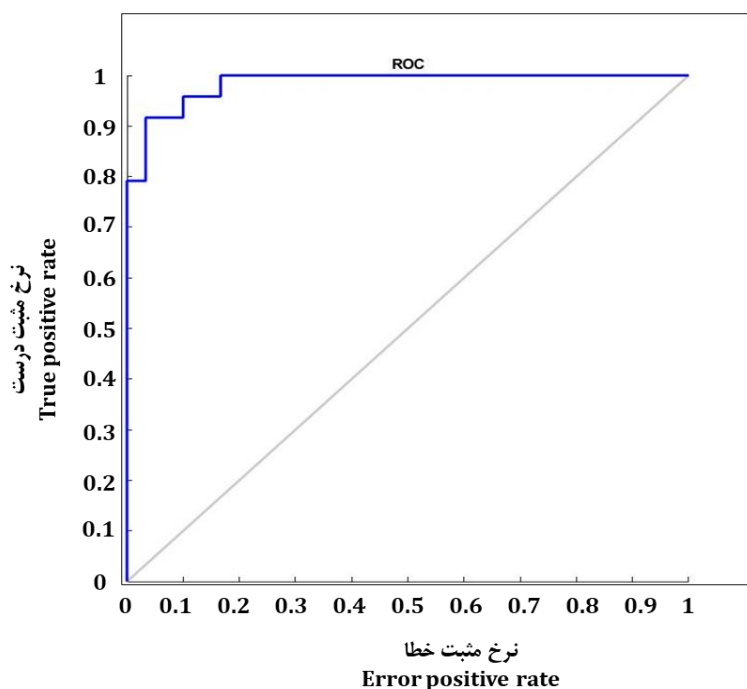
Fig. 9. Coefficient of determination for regression (right) and reduction in training error per tree

پس از آموزش مدل و اعتبارسنجی آن، اعداد خطرپذیری زمین لغزش برای تمامی منطقه در بازه عددی ۰ الی ۱ به‌دست آمد. سپس نتایج مدل به محیط ArcGIS منتقل و نقشه نهایی تهیه شده در ۵ کلاس آسیب‌پذیری با روش طبقه‌بندی شکست طبیعی^۲، تهیه شد. بر اساس نتایج منحنی ROC، مقدار سطح منحنی منطقه مورد نظر با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی ۰/۹۴ برآورد گردیده است (شکل ۱۰). با توجه به نقشه خطرپذیری لغزش در حوضه آبخیز گلندرد، بیش از ۳۰ درصد منطقه در کلاس خطر بسیار زیاد، ۱۹ درصد از

1 ooB: Out of Bag Error

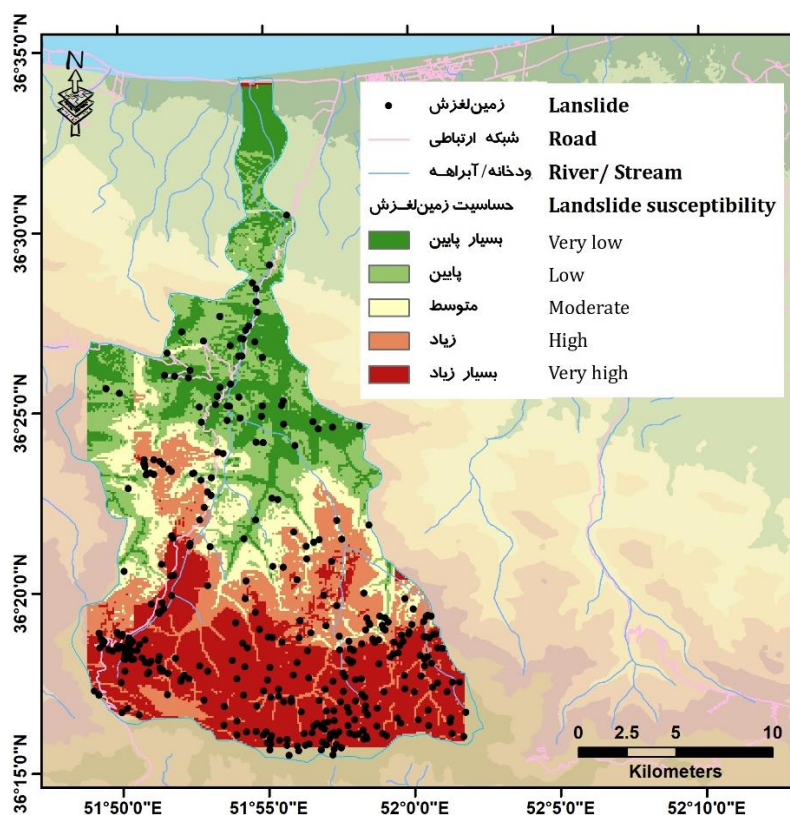
2 Natural Break

منطقه مورد مطالعه در کلاس خطر زیاد، ۱۳ درصد در کلاس متوسط، ۱۹ درصد در کلاس کم و ۱۶ درصد از حوضه مطالعاتی در کلاس خطر زمین لغزش خیلی کم قرار دارد (شکل ۱۱).



شکل ۱۰- نمودار منحنی عملکردی راک و مقدار عددی سطح زیر نمودار
Fig. 10. ROC curve and numerical value of the area under the curve

نتایج به دست آمده از مدل جنگل تصادفی به صورت وزن و اهمیت متغیرها در وقوع حرکات لغزشی در جدول ۱ آورده شده است. بر این اساس، بیشترین وزن با رتبه معیار ۰/۹۸ مربوط به ارتفاع می باشد که در رده اول قرار می گیرد؛ با توجه به که کوهستانی بودن و پر شیب بودن دامنه ها، این امر هر ساله باعث ایجاد حرکات لغزشی در محدوده مطالعاتی می شود. طی بازدیدهای میدانی که از منطقه صورت گرفته است، این حرکات بیش تر در شیب های ۳۰ درجه به بالا رخ داده که با مدل انجام شده همخوانی دارد. دومین عامل در ایجاد این حرکات، متغیر فاصله از گسل با وزن ۰/۸۵ است. فاصله از آبراهه، شیب دامنه و بارش، عامل های بعدی اثرگذار بر رخداد زمین لغزش در حوضه آبریز گلندرود هستند.



شکل ۱۱- نقشه ارزیابی حساسیت خطر زمین لغزش با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی

Fig. 11. Landslide hazard susceptibility assessment map using the random forest algorithm

جدول ۱- وزن متغیرهای مورد استفاده بر مبنای مدل جنگل تصادفی در مدل سازی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش در حوضه آبخیز گلندرود

Table 1- Weight of used variables based on random forest model in modeling factors affecting landslide occurrence in Glandrood watershed

متغیر Variable	ارتفاع Elevation	فاصله از گسل Dis. From Fault	فاصله از آبراهه Dis. From River	شیب Slope	بارش Precipitation	دما Temperature	فاصله از جاده Dis. From Road	کاربری اراضی Landuse	فرم دامنه Curvature	جهت دامنه Aspect	لیتولوژی Lithology
وزن Weight	0.98	0.85	0.65	0.57	0.45	0.27	0.18	0.17	0.13	0.03	0.02
رتبه Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

بررسی حرکات لغزشی در حوضه مورد بررسی نشان می‌دهد که این حوضه به دلیل داشتن شرایط طبیعی از جمله ساختمان گسلی، شیب زیاد، اقلیم مرطوب، خاک حساس و غیر مقاوم، دارای استعداد لغزشی بوده و دخالت انسان در آن، سبب ایجاد و تشدید این حرکات می‌شود. یافته‌های اثرگذاری عوامل بر حساسیت زمین لغزش گلندرود با یافته‌های پژوهش‌های پیشین از جمله طالبی (Talebi, 2011; Talebi et al., 2018) همخوانی دارد. از مقایسه لغزش‌های ناشی از دخالت انسان با لغزش‌های ناشی از شرایط طبیعی، معلوم می‌شود که دامنه‌هایی که کم‌تر مورد دخالت انسان بوده‌اند، در آن شیب لازم برای ایجاد حرکات دامنه‌ای و لغزشی، عمدتاً بالای ۵۰ درصد می‌باشد. این در حالی است که دامنه‌هایی که بیش‌تر مورد دخالت و استفاده انسان قرار گرفته‌اند (دامنه‌های پاک‌سازی شده از جنگل، جنگل بهره‌برداری شده، زمین‌های زراعی و مسکونی، جاده‌ها و ...)، این مقدار شیب به ۲۰ درصد تقلیل می‌یابد. یافته‌های حاصل از آزمایش بافت خاک در مناطق لغزشی، بیان‌گر این موضوع می‌باشد که نوع بافت خاک منطقه متشکل از چهار نوع بافت لومی رسی، لومی شنی، لومی رسی شنی و رسی است؛ بر این اساس، دانه‌بندی خاک نشان‌دهنده ساختمان ریزدانه آن می‌باشد. این نکته اثرگذاری عامل خاک حساس در وقوع پدیده زمین لغزش در این منطقه را توجیه می‌کند (Raefatnia, 2011; Kaviyanpour & Ahmadi, 2011).

تحلیل مفهوم کاتنا که بیان‌گر ارتباط میان الگو و چشم‌انداز خاک بر روی شیب دامنه با توپوگرافی است و منجر به تغییرپذیری خصوصیات خاک و به دنبال آن تغییر در پوشش گیاهی می‌شود، می‌تواند توجیه ارتباط یا اثرگذاری عامل ارتفاع بر حرکات لغزشی منطقه مطالعاتی باشد. گسترش پوشش جنگلی منطقه تا حد ارتفاعی ۲۳۰۰ متر بوده و بالاتر از آن، تراکم جنگل و پوشش گیاهی کم می‌شود. بیش‌تر لغزش‌ها در زمین‌ها و دامنه‌هایی اتفاق افتاده است که از نظر پوشش گیاهی دارای پوشش علفی بوده یا در آن بهره‌برداری به صورت قطع یک‌سره درخت صورت گرفته است، یا این‌که محور جاده سبب قطع پیوستگی دامنه شده و یا در آن ارتفاع و دامنه، پوشش گیاهی اندک است. اثر پوشش گیاهی به این صورت است که هر چه این مقدار فقیرتر باشد، زمینه برای وقوع این پدیده مستعدتر می‌شود. نمونه‌هایی از دخالت انسانی در حوضه آبخیز گلندرود در شکل ۱۲ نشان داده شده است، شامل: قطع درختان و از بین بردن پیوستگی دامنه برای جاده‌سازی بدون توجه به جریان آب‌های جاری سطحی و زیر سطحی و به صورت کلی سیستم زهکشی طبیعی. با وجود ایجاد سازه‌های استحکام‌بخشی در دیواره دامنه، بر هم زدن تعادل طبیعی، به صورت از بین بردن پوشش درختان و اختلال در سیستم زهکشی، سبب می‌شود رسوبات بارگذاری شده بر روی دامنه، پس از مدتی به حالت ناپایدار درآمده و سازه‌های ایجاد شده نیز قادر به کنترل حرکت آن‌ها نباشند.

بارش‌های منطقه و حرکت آب‌های سطحی و نفوذ آن در بین ذرات خاک، موجب کاهش پیوستگی اراضی شیب‌دار نسبت به وقوع زمین لغزش می‌شود. یافته‌های مدل‌سازی الگوریتم جنگل تصادفی هم، بارش را به عنوان یکی از اثرگذارترین متغیرها بر رخداد حرکات لغزشی در حوضه آبخیز گلندرود، معرفی می‌کند که با یافته‌های تیموری و اسدی (Teimouri & Asadi Nalivan, 2020) و چن و همکاران (Chen, Zhang, Li & Shahabi, 2018) مبنی بر افزایش میزان حساسیت به وقوع زمین لغزش با افزایش بارندگی، همخوانی دارد. بارش‌های سطح

حوضه، جاری شدن آب و نفوذپذیری آن در خاک، سبب می‌شود مناطقی که دارای نفوذپذیری سریع‌تری نسبت به عبور آب هستند، دارای لغزش‌های بیش‌تری می‌باشند و زمانی که بافت خاک رسی در پروفیل خاک قرار گیرد، سبب نگه‌داشت آب در خاک شده و منجر به ناپایداری در دامنه‌ها می‌شود. آب حاصل از ریزش باران سبب شست‌وشوی مواد سیمانی که عامل پیوستگی ذرات خاک هستند، می‌شود و از پیوستگی خاک کم کرده، مقاومت مکانیکی خاک را کاهش می‌دهد و عامل محرک محسوب می‌شود.



شکل ۱۲- نمونه‌هایی از دخالت انسانی در حوضه گلندرود و اتفاق افتادن حرکات دامنه‌ای: الف)

زمین لغزش، ب) خزش

Fig. 12. Examples of human intervention in Glandrood watershed and the occurrence of slope movements: A) Landslide, B) Creep

نتیجه‌گیری

شناسایی پهنه‌های مستعد لغزش و ارزیابی حساسیت رخدادهای زمین‌لغزش، برای اجتناب از این پهنه‌ها و اجرای روش‌های پیش‌گیری و کنترلی بسیار ضروری و با اهمیت است. یکی از اصلی‌ترین اقدامات در این زمینه، تهیه نقشه‌های ارزیابی حساسیت خطر رخدادهای زمین‌لغزش است. برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیرندگان می‌توانند از نقشه‌های مورد اشاره در عرصه‌های مختلفی چون مدیریت حفاظت خاک و منابع طبیعی، برنامه‌ریزی‌های عمرانی و گردشگری، مکان‌یابی اراضی مناسب برای توسعه شهرها و روستاها، برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی، تعیین مسیر راه‌ها و خطوط انتقال نیرو و انرژی استفاده کنند. در همین ارتباط، تعیین میزان اثرگذاری و اهمیت هر کدام از متغیرها بر وقوع حرکات لغزشی، می‌تواند گام بعدی برای کاهش و کنترل این حرکات در منطقه مطالعاتی باشد. مدل‌سازی الگوریتم جنگل تصادفی بر اساس متغیرهای مؤثر بر وقوع حرکات لغزشی در حوضه آبخیز گلندرود، بیان‌گر آن است که بیش‌ترین مساحت این حوضه در کلاس‌های با حساسیت زمین‌لغزش خیلی زیاد و زیاد قرار گرفته است. تحلیل ارتباط وقوع زمین‌لغزش با عوامل مؤثر، نشان می‌دهد ارتفاع مهم‌ترین عامل اثرگذار بر وقوع این پدیده در حوضه مورد مطالعه می‌باشد. در توجیه اثرگذاری عامل ارتفاع به‌عنوان مهم‌ترین عامل، می‌توان به رابطه تراکم پوشش گیاهی و ارتفاع در حوضه آبخیز گلندرود اشاره داشت. گسترش پوشش جنگلی منطقه تا حد ارتفاعی ۲۳۰۰ متر بوده و بالاتر از آن، تراکم جنگل و پوشش گیاهی کم می‌شود. در کنار ۱۱ متغیر مؤثر بر وقوع حرکات لغزشی حوضه آبخیز گلندرود که در این پژوهش بررسی شد، با توجه به گردشگرپذیر بودن منطقه، ساخت شهرک‌ها و مجتمع‌های مسکونی در آن دارای سرعت چشم‌گیری بوده و به همین علت، پوشش گیاهی در قسمتی از منطقه مطالعاتی به‌صورت پوشش گیاهی علفی و نهایتاً درختچه‌ای تغییر یافته است. از طرفی، ساخت ابنیه بر روی خاک حساس به لغزش در منطقه مطالعاتی، به شکل عامل محرک برای تشدید این پدیده در آمده است؛ به‌صورتی که می‌توان یکی از علل وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز گلندرود را وزن ناشی از احداث ساختمان‌های سیمانی و سنگی دانست.

References

- Abedini, M., & Mohammadzadeh Shisha Garan, M. (2022). Landslide assessment using radar images and radar interferometry Case area: Nirchai Basin. *Journal of Environmental Science Studies*, 7(3), 5161-5171. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jess.2022.335908.1758.html>
- Akbarimehr, M., Motagh, M., & Haghshenas-Haghighi, M. (2013). Slope stability assessment of the Sarcheshmeh Landslide, Northeast Iran, Investigated using InSAR and GPS observations. *Remote Sensing*, 5(8), 3681-3700. <https://doi.org/10.3390/rs5083681>
- Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(1), 21-44. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>
- Alijani, B. (2003). *The Climate of Iran*. Payam Noor University Press, Tehran. [In Persian]
- Amiri, M., Pourghasemi, H. R., Ghanbariana, G. A., & Afzali, S. F. (2019). Assessment of the importance of gully erosion effective factors using Boruta algorithm and its spatial modeling and mapping using three machine learning algorithms. *Geoderma*, 340, 55-69. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.042>
- Arabameri, A., Pradhan, B., Pourghasemi, H. R., Rezaei, K., & Kerle, N. (2018). Spatial modelling of gully erosion using GIS and R programing: A comparison among three data mining algorithms. *Applied Sciences*, 8(8), 1369. <https://doi.org/10.3390/app8081369>
- 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, 2375-2383. <https://doi.org/10.3390/app8081369>
- Carlà, T., Intrieri, E., Di Traglia, F., & Casagli, N. (2016). A statistical-based approach for determining the intensity of unrest phases at Stromboli volcano (Southern Italy) using one-step-ahead forecasts of displacement time series. *Natural Hazards*, 84(1), 669-683. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2451-5>
- Carlà, T., Intrieri, E., Farina, P., & Casagli, N. (2017). A new approach to assess the stability of rock slopes and identify impending failure conditions. In *Workshop on World Landslide Forum, Springer, Cham*, 733-739. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-53498-5_84
- Chen, W., Zhang, S., Li, R., & Shahabi, H. (2018). Performance evaluation of the GIS-based data mining techniques of best-first decision tree, random forest, and naïve Bayes tree for landslide susceptibility modeling. *Science of the Total Environment*, 644, 1006-1018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.389>
- Davoudi Moghaddam, D., Pourghasemi, H. R., & Rahmati, O. (2019). Assessment of the contribution of geo-environmental factors to flood inundation in a semi-arid region of SW Iran: Comparison of different advanced modeling approaches. Natural hazards GIS-based spatial modeling using data mining techniques. In H.R. Pourghasemi, and M. Rossi (Eds.), *Natural hazards GIS-based spatial modeling using data mining techniques*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73383-8_3
- Derafshi, K., Motevalli, S., Hosseinzadeh, M., & Esmaeili, R. (2013). Zoning the landslide hazard in the Taleghan watershed using frequency ratio and multivariate regression. Paper

- presented at the Proceedings of the Second National Conference of the Iranian Geomorphology Association (Geomorphology and Environmental Change Monitoring), Faculty of Geography, University of Tehran, 12-17. [In Persian]
- Di Martire, D., Tessitore, S., Brancato, D., Ciminelli, M. G., Costabile, S., Costantini, M., ... & Calcaterra, D. (2016). Landslide detection integrated system (LaDIS) based on in-situ and satellite SAR interferometry measurements. *Catena*, 137, 406-421. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.002>
- Ebrahimkhani, R., Afzali, M., & Shokoohi, A. (2011). Prediction and analysis of factors in road traffic accidents using the random forest algorithm. *Danesh-e Entezami-e Zanzan*, 1(1), 111-127. [In Persian]
- Fruneau, B., Achace, J., & Delacourt, C. (1996). Observation and modeling of the Saint- Etienne-de Tine'e landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics*, 265(3-4), 181-190. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00047-9)
- Garosi, Y., Sheklabadi, M., Besalatpour, A. A., Pourghasemi, H. R., Conoscenti, C., & Van Oost, K. (2018). Comparison of the different resolution and source of controlling factors for gully erosion susceptibility mapping. *Geoderma*, 330, 65-78. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.027>
- Hilley, G. E., Bürgmann, R., Ferretti, A., Novali, F., & Rocca, F. (2004). Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis. *Science*, 304(5679), 1952- 1955. <https://doi.org/10.1126/science.1098821>
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31(23), 1-5. <https://doi.org/10.1029/2004GL021737>
- Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., Fanti, R., & Casagli, N. (2012). Design and implementation of a landslide early warning system. *Engineering Geology*, 147, 124-136. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.017>
- Jaboyedoff, M., Michoud, C., Derron, M. H., Voumard, J., Leibundgut, G., Sudmeier-Rieux, K., ... & Leroi, E. (2018). Human-induced landslides: toward the analysis of anthropogenic changes of the slope environment. In *Landslides and engineered slopes. Experience, theory and practice*. CRC Press, 217-232. <http://dx.doi.org/10.1201/b21520-20>
- Karam, A., & Tourani, M. (2013). Zoning the land susceptibility to landslides using linear regression and hierarchical analysis process, case study: Haraz Axis from Rudehen to Rineh. *Applied Research in Geographical Sciences*, 13(28), 177-190. [In Persian] <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-691-fa.html>
- Karimi Sangchini, E., Awnagh, M., & Saedaldin, A. (2012). Comparing applicability of 4 quantitative and semi-quantitative models in landslide hazard zonation in Chehel-Chay watershed, Golestan province. *Water and Soil Conservation*, 19(1), 183-196. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222069.1391.19.1.11.2>
- Lauknes, T. R., Shanker, A. P., Dehls, J. F., Zebker, H. A., Henderson, I. H. C., & Larsen, Y. (2010). Detailed rockslide mapping in northern Norway with small baseline and persistent scatterer interferometric SAR time series methods. *Remote Sensing of Environment*, 114(9), 2097-2109. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.015>

- Lieb, M., Glaser, B., & Huwe, B. (2012). Uncertainty in the spatial prediction of soil texture: comparison of regression tree and Random Forest models. *Geoderma*, 170, 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.10.010>
- Metternicht, G., Hurni, L., & Gogu, R. (2005). Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geospatial system for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment*, 98(2-3), 284-303. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.08.004>
- Mora, O., Mallorqui, J. J., & Broquetas, A. (2003). Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(10), 2243-2253. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.814657>
- Motevalli, S., Hosseinzadeh, M., Esmaeili, R., & Derafshi, K. (2015). Evaluation of the accuracy of Multivariate Regression (MR), Logistic Regression (RL), Analytic Hierarchy Process (AHP), and Fuzzy Logic (FL) methods in landslide hazard zoning in the Taleghan watershed. *Quantitative Geomorphology Research*, 14(1), 1-20. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1394.4.1.1.4>
- Naghibi, A., & Pourghasemi, H. R. (2015). A comparative assessment of three machine learning models and their performance comparison by bivariate and multivariate. *Water Resource Management*, 29, 5217-5236. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-015-1114-8>
- Nicodemus, K. K. (2011). Letter to the Editor: On the stability and ranking of predictors from random forest variable importance measures. *Briefings in Bioinformatics*, 12, 369-373. <https://doi.org/10.1093%2Fbib%2F12.3.369>
- Peters, J., Verhoest, N., Samson, R., Boeckx, P., & De Baets, B. (2008). Wetland vegetation distribution modelling for the identification of constraining environmental variables. *Landscape Ecology*, 23, 1049- 1065. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9261-4>
- Pirasteh, S., & Li, J. (2017). Landslides investigations from geoinformatics perspective: quality, challenges, and recommendations. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1-18. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1238850>
- Raefatnia, N., Kaviyanpour, M. K., & Ahmadi, T. (2011). Investigating the causes of landslide phenomena in the Glandrood forest (Case study, Series 3, Watershed 48). *Natural Resources Science and Technology*, 6(1), 53-63. [In Persian] <https://sanad.iau.ir/journal/jstnr/Article/1077144>
- Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Melesse, A. M. (2016). Application of GIS-based data-driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: A case study at Mehran Region, Iran. *Catena*, 137, 360-372. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.010>
- Rott, H., Scheuchl, B., Siegel, A., & Grasemann, B. (1999). Monitoring very slow slope movements by means of SAR interferometry: a case study from a mass waste above a reservoir in the Ötztal Alps, Austria. *Geophysical Research Letters*, 26(11), 1629-1632. <https://doi.org/10.1029/1999GL900262>
- Sabeti, H., Motagh, M., Sharifi, M. A., Akbari, B., Akbarimehr, M., & Fard, D. (2019). Determination of the displacement rate of the Masoumeh landslide for management of

- landslide risk by Radar Interferometry. *Iranian Journal of Watershed Management Sciences*, 13(44), 103-113. [In Persian] <http://jwmsei.ir/article-1-745-fa.html>
- Strozzi, T., Farina, P., Corsini, A., Ambrosi, C., Thüning, M., Zilger, J., ... & Werner, C. (2005). Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry. *Landslides*, 2, 193-201. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0003-2>
- Talebi, A. (2011). Investigating the effect of subsurface flows on the occurrence of surface landslides. Paper presented at the Proceedings of the 7th National Conference on Watershed Science and Engineering of Iran. [In Persian]
- Talebi, A., Goudarzi, S., & Pourghasemi, H. R. (2018). Investigation of the possibility of landslide hazard mapping using the Random Forest algorithm (Case study: Sardarabad Watershed, Lorestan Province). *Natural Environmental Hazards*, 7(16), 45-64. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/jneh.2017.3213>
- Teimouri, M., & Asadi Nalivan, O. (2020). Susceptibility zoning and prioritization of the factors affecting landslide using MaxEnt, geographic information system and remote sensing models (Case study: Lorestan Province). *Hydrogeomorphology*, 6(21), 155-179. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23833254.1398.6.21.8.3>
- Youssef, A. M., Pourghasemi, H. R., Pourtaghi, Z. S., & Al-Katheeri, M. M. (2015). Landslide susceptibility mapping using the random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin. *Asir Region, Saudi Arabia, Landslides*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0614-1>
- Zeng, T., Guo, Z., Wang, L., Jin, B., Wu, F., & Guo, R. (2023). Tempo-Spatial landslide susceptibility assessment from the perspective of human engineering activity. *Remote Sensing*, 15(16), 4111(1-28). <https://doi.org/10.3390/rs15164111>
- Zhao, C., & Lu, Z. (2018). Remote sensing of landslides - A review. *Remote Sensing*, 10(2), 279 (1-6). <https://doi.org/10.3390/rs10020279>



Evaluation of relationship between soil quality index and organic carbon changes as a function of different land uses

(Case study: Sahand region of East Azerbaijan province)

Solmaz Bidast^{a*}, Ahmad Golchin^b

^a Postgraduate Researcher in Soil Science in Soil science, University of Zanjan, Zanjan, Iran

^b Professor in Soil science, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Article Info

Abstract

Article history

Received : 16 April 2023

Received in revised form :
12 May 2023

Accepted : 18 June 2023

Available online:
21 March 2025

Keywords:

Non-linear scoring
functions,
Organic carbon,
Rangeland,
Soil quality

Rangeland soils have always been of interest due to their high organic content, but the change of land use influences the amount of organic carbon, which plays a key role in soil quality. In this research, the quantification of soil quality in the Sahand rangeland, East Azerbaijan Province, and its possible relationship with soil organic carbon were investigated. One hundred and twenty soil samples were taken from two undisturbed and wheat-cultivated rangelands at one sampling depth (0–30 cm) in October 2022. Thirteen soil physical and chemical parameters were measured and screened through principal component analysis (PCA). The minimum data set obtained by PCA was scored by a non-linear scoring function, and then integrated into a soil quality index. Finally, stepwise multiple linear regression was employed to determine the relationship patterns between soil organic carbon and soil attributes. The results showed that the value of the soil quality index in the undisturbed rangeland (0.78) was significantly higher than in the cultivated rangeland (0.63). The highest score value used to estimate the soil quality index was related to the organic carbon indicator (0.73). The mean weight diameter (0.72), clay percentage (0.93), bulk density (0.24), and saturated water content (0.04) in the undisturbed rangeland soil, and acidity (-0.13) and electrical conductivity (-0.48) in the cultivated rangeland soil showed a significant effect on soil organic carbon (as indicated by the highest standardized regression coefficient). It can be concluded that different land use systems play an important role in changing soil quality by affecting the soil attributes, and thus changing the input and preservation of organic carbon in the soil.

*.Corresponding author : Dr. Solmaz Bidast E-mail address: Solmazbidast@yahoo.com

How to cite this article: Bidast, S., & Golchin, A., (2025). Evaluation of relationship between soil quality index and organic carbon changes as a function of different land uses (Case study: Sahand region of East Azerbaijan province). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), pp.275-298.

DOI: <https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.81986.1354>



Extended Abstract

Introduction

Grassland ecosystems cover about 40% of the Earth's surface and 11 million hectares in Iran. They are essential for biodiversity, livestock forage, soil erosion control, and carbon storage. However, their ability to provide these services depends on proper land management. Soil quality, defined as the capacity to maintain productivity, environmental health, and plant growth, can be negatively affected by land-use changes, such as converting grasslands to agricultural land. Organic carbon is a key indicator of soil quality, especially in arid and semi-arid regions, and can be improved through land management practices, impacting carbon sequestration and reducing atmospheric CO₂. The study focuses on comparing soil quality and organic carbon levels between natural grassland and wheat fields in the Sahand region of East Azerbaijan, and investigating their correlation with soil physical and chemical properties.

Material and Methods

The study was conducted in the Sahand rangelands, located 50 km southeast of Tabriz, where annual rainfall ranges from 300 to 500 mm. The rangeland, rather than forest, is due to the region's topography and short growing season. Two sites with different land uses (natural rangeland and rain-fed wheat) were selected, both with similar environmental conditions (18% slope, northern aspect, and 2,632 meters elevation). Soil samples were collected in October 2022 using a linear transect method. Two transects of 50 meters were established per site, with 10 random 1×1 meter plots for sampling from a 0–30 cm depth. A total of 120 samples (60 per site) were analyzed for various soil properties in the lab. The Soil Quality Index (SQI) was calculated by identifying key indicators through Principal Component Analysis (PCA), scoring them, and aggregating the results. A stepwise regression model was used to relate soil organic carbon to other soil properties, with validation based on adjusted R² and the standard error of the estimate.

Results and Discussion

The comparison of mean physical and chemical properties of soil using an independent t-test at a 5% significance level showed significant differences between the soil properties under the two land-use systems. The cation exchange capacity (cmolc kg⁻¹ 15.65), organic carbon (% 1.62), total nitrogen (% 0.15), clay (% 23.58), saturation moisture (% 41.16), and mean weight diameter of soil aggregates (mm 2.32) were significantly higher in the pasture land-use compared to the agricultural land. On the other hand, acidity (pH 7.34), electrical conductivity (dS m⁻¹ 0.39), sand (% 55.65), calcium carbonate equivalent (% 7.43), and bulk density (g cm⁻³ 1.16) were significantly higher in the agricultural land-use. The land-use change from pasture to agricultural land resulted in reductions of 13.54% for cation exchange capacity, 18.51% for organic carbon, 26.66% for total nitrogen, 4.79% for clay, 19.16% for saturation moisture, 56.03% for the mean weight diameter of soil aggregates, and 2.29% for silt. Conversely, acidity, electrical conductivity, sand, calcium carbonate, and bulk density increased by 6.99%, 25.80%, 0.05%, 23.62%, and 33.33%, respectively. Increased tillage activities in agricultural lands boost microbial activities, leading to a greater breakdown of organic matter and a consequent decrease in soil organic content. Furthermore, the absence of vegetation on the soil surface increases soil erosion and further depletes organic matter and fine soil particles (clay and silt) from agricultural soils. Land-use change causes significant alterations in soil properties, including a decrease in soil quality, rendering it more prone to erosion.

The effects of land-use type on soil quality were evaluated using the Soil Quality Index (SQI). Principal Component Analysis (PCA) of twelve soil physical and chemical properties identified three main components that explained most of the variance. The first component, primarily characterized by organic carbon, explained 58.79% of the total variance and was selected as a key indicator for the Minimum Data Set (MDS). The second component, represented by cation exchange capacity and electrical conductivity, explained 26.15% of the variance and was also selected for MDS. The third component, which correlated with silt and acidity, was similarly included in the MDS. In total, five variables—organic carbon, cation exchange capacity, acidity, electrical conductivity, and clay—were chosen as indicators for the MDS. Non-linear scoring functions for each of the selected indicators were compared using a t-test, revealing significant differences between the two land-use types. Organic carbon, clay, and cation exchange capacity had the highest scores in pasture soils, while in agricultural soils, the highest scores were recorded for organic carbon, acidity, electrical conductivity, clay, and cation exchange capacity. The soil quality index for the pasture land-use (0.78) was significantly higher than that of the agricultural land-use (0.63), indicating a better soil quality in the pasture. Based on a four-tier quality classification, the pasture soil was categorized as high-quality soil (Grade II), while the agricultural soil fell into the moderate-quality category (Grade III).

Conclusion

This study found significant differences in most soil properties between undisturbed rangeland and agricultural soils, with five key indicators (organic carbon, clay percentage, cation exchange capacity, pH, and electrical conductivity) affecting soil quality. Converting rangeland into agricultural land led to a decline in soil quality, primarily due to reduced organic carbon input. The study highlighted that organic carbon played a major role in maintaining higher soil quality in rangelands. Seasonal vegetation removal in agricultural soils increased acidity and electrical conductivity, further decreasing organic carbon and soil quality. Overall, MDS indicators influence soil quality both directly and indirectly through organic carbon levels.



ارزیابی ارتباط بین شاخص کیفیت خاک و تغییرات کربن آلی تحت تأثیر کاربری‌های مختلف

(مطالعه موردی: منطقه سه‌هند استان آذربایجان شرقی)

سولماز بی‌دست^{۱*}، احمد گلچین^۲

^{۱*} محقق پسادکتری گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۲ استاد گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله	خاک‌های مرتعی به علت دارا بودن مواد آلی زیاد همواره مورد توجه بوده است، در حالیکه تغییر کاربری آن‌ها تأثیر زیادی بر مقدار کربن آلی به‌عنوان کلید کیفیت خاک می‌گذارد. در این تحقیق کمی کردن کیفیت خاک در مراتع سه‌هند استان آذربایجان شرقی و ارتباط احتمالی آن با کربن آلی خاک مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌های خاک از دو کاربری مرتع و زراعی با استفاده از روش نمونه-برداری خطی جمع‌آوری و ۱۲ ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک اندازه‌گیری و مقایسه آماری بین آن‌ها انجام شد. با استفاده از روش تجزیه مؤلفه اصلی، حداقل مجموعه داده‌ها مؤثر بر کیفیت خاک استخراج گردید. سپس با کمک توابع امتیازدهی غیرخطی، شاخص کیفیت خاک تخمین زده شد. در نهایت الگوهای ارتباطی بین موثرترین نشانگر شناسایی شده و سایر ویژگی‌های خاک با استفاده از رگرسیون چند متغیره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار شاخص کیفیت خاک مرتع (۰/۷۸) به طور معنی‌داری بالاتر از خاک زراعی (۰/۶۳) بود. کربن آلی بالاترین امتیاز (۰/۷۳) را در محاسبه کیفیت خاک به خود اختصاص داد. میانگین وزنی قطر خاکدانه (۰/۷۲)، رس (۰/۹۳)، جرم مخصوص ظاهری (۰/۲۴-) و رطوبت اشباع در خاک مرتع (۰/۰۴) و اسیدیته (۰/۱۳-) و هدایت الکتریکی (۰/۴۸-) در خاک زراعی ارتباط معنی‌داری (بیشترین ضریب رگرسیونی) را با کربن آلی نشان دادند. به‌طور کلی می‌توان بیان نمود که کاربری‌های مختلف نقش مهمی را در تغییر کیفیت خاک از طریق اثرگذاری بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و به‌تبع آن تغییر در ورودی کربن آلی به خاک و حفظ آن در خاک ایفاء می‌کنند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱/۲۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۲/۲۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۲۸	
کلمات کلیدی:	
توابع امتیازدهی غیرخطی	
کربن آلی	
کیفیت خاک	
مرتع	

مقدمه

اکوسیستم های مرتعی حدود ۴۰ درصد از مساحت کل کره زمین را پوشش می‌دهند و در ایران سطحی معادل ۱۱ میلیون هکتار، بیش از ۱۹ درصد از مساحت ایران را در بر می‌گیرند (Zohdi, Arzani, Javadi, 2018; Jalili & Khorshidi, 2018). مراتع یکی از اجزاء ضروری چرخه بیوژئوشیمیایی هستند (Janes-Bassett, 2020; Davies, Rowe & Tipping, 2020). مراتع نه تنها نقش مهمی را در تولید مواد غذایی برای جمعیت جهان ایفاء می‌کنند بلکه به جهت حمایت از تنوع زیستی، حفظ علوفه برای دام، کنترل سیل و فرسایش خاک نیز از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشند (Bengtsson et al., 2019). با این وجود، ظرفیت مراتع برای ارائه خدمات مختلف به اکوسیستم تا حد زیادی به مدیریت استفاده از آن‌ها بستگی دارد (Vargas, Willemsen & Hein, 2019). سلامت مراتع و نحوه عملکرد آن‌ها به کیفیت در بلند مدت بستگی دارد (Li et al., 2013). به طور کلی کیفیت خاک به عنوان ظرفیت خاک برای حفظ بهره‌وری، حفظ کیفیت محیطی، ارتقاء رشد گیاهان و همچنین سلامت حیوانات تعریف شده است (Bai et al., 2018). به منظور بررسی اثر عملکرد خاک تحت کاربری‌های مختلف و شیوه‌های مدیریتی زمین، چندین ویژگی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را به صورت جداگانه یا مشترک در نظر می‌گیرند. تغییر کاربری اراضی اغلب می‌تواند منجر به تغییرات منفی در عملکرد خاک شود (Raiesi & Riahi, 2014; Spohn & Giani, 2011). بنابراین ابزارها و روش‌های جامع برای ارزیابی این تغییرات ضروری است. برای ارزیابی منسجم و دقیق کیفیت خاک، یک روش سیستماتیک جهت تفسیر و اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک مورد نیاز است (Bünemann et al., 2018). بررسی ویژگی‌های ذاتی خاک به طور جداگانه ممکن است نشانگر مناسبی از کیفیت خاک نباشند. ویژگی‌های ذاتی خاک اغلب به یکدیگر وابسته هستند و ممکن است به تغییرات کاربری زمین به روشی متفاوت پاسخ دهند و اثرات آن‌ها را مخدوش کنند (Raiesi, 2017). مطالعات پیشین بیشتر بر روی اثرات تبدیل کاربری اراضی در اکوسیستم‌های مرتعی بر خصوصیات ذاتی خاک متمرکز شده‌اند (Raiesi & Beheshti, 2014; Salek-Gilani, Raiesi, Tahmasebi & Ghorbani, 2013; Spohn & Giani, 2011) و توجه کمتری به ارزیابی جامع تغییرات کیفیت خاک با استفاده از یک رویکرد یکپارچه شده است. اگرچه ارزیابی کیفیت خاک به عنوان ابزاری برای کمی‌سازی و ارزیابی اثرات شیوه‌های مدیریت خاک، سیستم‌های خاک‌ورزی، نوع کاربری زمین و پوشش گیاهی بر عملکرد خاک استفاده شده است (Armenise, Redmile-Gordon, Stellacci, Ciccacese & Rubino, 2013; Rahmanipour, Marzaioli, 2014; Bahrami, Fereidouni & Bandarabadi, 2014)، ولی با این حال ارزیابی سیستماتیک کیفیت خاک برای اکوسیستم‌های مرتعی تبدیل شده به زمین‌های زراعی بسیار کمتر مورد بررسی قرار گرفته است (Raiesi, 2017; Alves de Castro Lopes et al., 2013).

کربن آلی خاک یکی از پارامترهای مهم تعیین‌کننده میزان حاصلخیزی خاک، قابلیت تولید و شاخص مهمی در نشان دادن کیفیت خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک است که در آن مقادیر ورودی کربن ناچیز است. خاک با نگهداشت حدود ۱۵۰۰ میلیارد تن کربن نقش مهمی در چرخه جهانی کربن اتمسفر دارد (Khalil, 2019; Francaviglia & Henry, 2019). خاک‌ها حاوی کربن در اشکال آلی و معدنی (کربنات‌ها) هستند. با وجود

اینکه برای افزایش محتوای کربنات خاک‌ها، کار چندانی نمی‌توان انجام داد، اما افزایش محتوای کربن آلی خاک امکان‌پذیر است (Abbas et al., 2020). کربن آلی خاک به‌عنوان یک مخزن اصلی و منبع ذخیره مواد غذایی گیاهی با توان بالای نگهداری آب، بر کیفیت خاک مؤثر است و افزایش ترسیب کربن خاک یک استراتژی مؤثر برای کاهش کربن دی‌اکسید اتمسفر و بهبود کیفیت خاک می‌باشد (Buraka, Elias & Lelago, 2022).

شناخت نقش کربن آلی خاک در عملکردهای اکوسیستم و مدیریت پایدار منابع، نیازمند شناخت اجزاء و ذخیره‌گاه‌های کربن آلی و معدنی خاک در اکوسیستم می‌باشد (Xu et al., 2011). با توجه به گرم شدن زمین در اثر تصاعد گازهای گلخانه‌ای از جمله دی‌اکسیدکربن، بسیاری از دانشمندان به خاک به‌عنوان مخزنی ناشناخته برای ذخیره کربن اتمسفری علاقه‌مند شده‌اند. اما قبل از اینکه بتوان به‌صورت عملی از خاک استفاده نمود، لازم است که فرایندهای مؤثر در تثبیت کربن در خاک شناخته شده و روش‌های مناسبی برای تعیین مقدار و مدتی که کربن می‌تواند در خاک تثبیت گردد، ایجاد شوند.

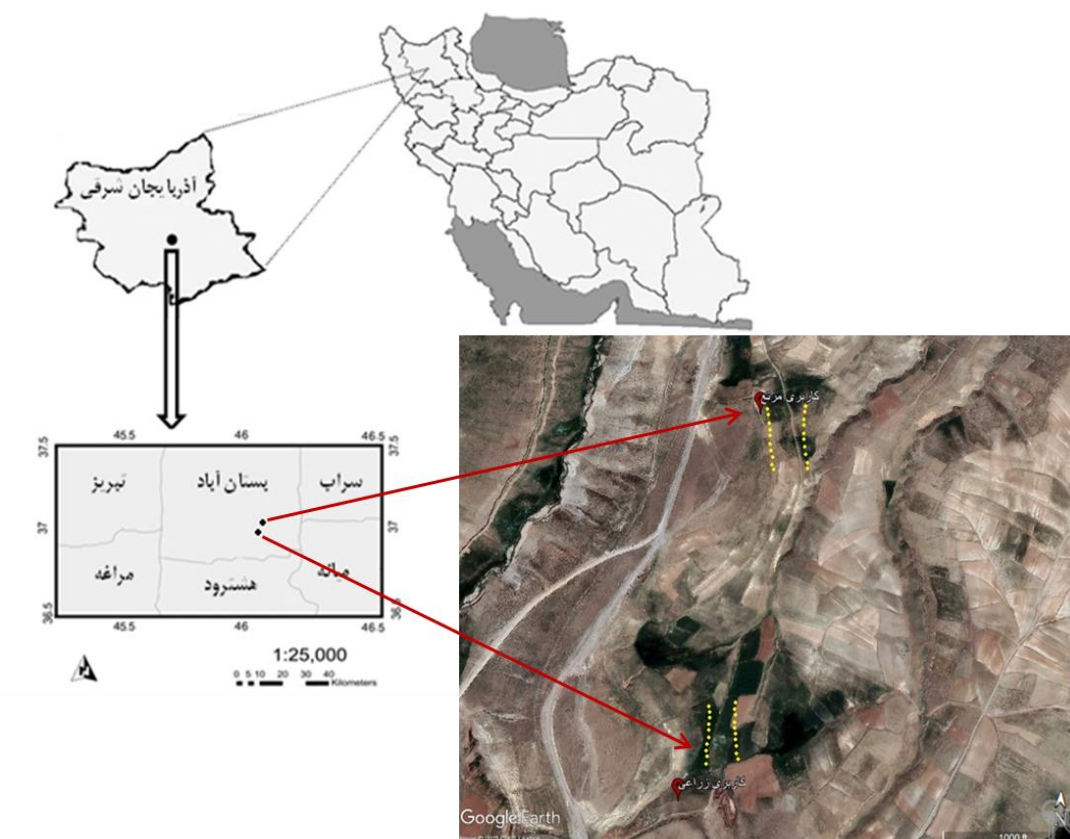
از عوامل مؤثر بر ذخیره کربن آلی در خاک می‌توان به مدیریت صحیح اراضی اشاره نمود. فعالیت‌های انسانی می‌تواند از طریق تغییرات الگوی کاربری اراضی بر ذخایر کربن خاک اثر بگذارد که به‌نوبه‌ی خود الگوی مصرف انرژی را تغییر می‌دهد و بر مقدار و نرخ تصاعد کربن تأثیرگذار است. تصاعد کربن ناشی از تغییر کاربری اراضی در سال ۲۰۰۹ در سطح جهان حدود ۱۶-۱۷ درصد برآورد شده است. حدود ۳۴ درصد از کل کربن سالیانه منتشر شده در جو ناشی از تغییر کاربری اراضی و ۶۶ درصد آن از طریق احتراق سوخت‌های فسیلی وارد هوا می‌شود (Friedlingstein et al., 2022).

بنابراین با توجه به موارد ذکر شده، در این تحقیق تفاوت کیفیت خاک و ارتباط احتمالی آن با تغییرات کربن آلی در دو کاربری مرتع دست‌نخورده و زراعی تحت کشت گندم در منطقه سه‌سند استان آذربایجان شرقی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این تحقیق وجود همبستگی و ارتباط بین میزان کربن آلی خاک و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در هر کاربری مورد بررسی و آزمایش قرار داده شد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

مراتع سه‌سند در استان آذربایجان شرقی، در ۵۰ کیلومتری جنوب شرقی تبریز قرار دارد. مقدار بارندگی در این منطقه بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر در سال می‌باشد. به‌رغم بارندگی نسبتاً زیاد، ارتفاع بلند و کوتاه بودن فصل رویش موجب پیدایش پوشش مرتعی بجای جنگلی در این منطقه شده است. به منظور انجام این تحقیق دو محل نمونه‌برداری با ۲ کاربری متفاوت (مرتع دست‌نخورده و کشت دیم گندم) از دامنه کمال داغ مراتع سه‌سند استان آذربایجان و در محدوده جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۹ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و مساحت تقریبی ۱۰۰۰۰ متر مربع انتخاب گردید. لازم به ذکر است که خصوصیات محیطی (شیب: ۱۸ درصد، جهت: شمالی و ارتفاع: ۲۶۳۲ متر از سطح دریا) در مکان‌های انتخابی یکسان بودند (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی نقاط مورد مطالعه

Fig.1. Geographical location of the study points

نمونه‌برداری و تجزیه آزمایشگاهی

نمونه‌برداری خاک در اوایل مهرماه سال ۱۴۰۱ در هر کاربری به صورت تصادفی سیستماتیک با استفاده از روش خطی (ترانسکت^۱) انجام شد. به طوری که در هر کاربری دو ترانسکت به طول ۵۰ متر تعیین و در داخل هر یک تعداد ۱۰ پلات یک متر مربعی به صورت تصادفی جهت نمونه‌برداری خاک مشخص گردید. از هر پلات به تفکیک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری در سه تکرار، توسط اگر نمونه‌برداری انجام شد (از هر کاربری ۶۰ نمونه و در مجموع ۱۲۰ نمونه خاک). برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نظیر بافت خاک به روش هیدرومتر (Gee & Bauder, 1986)، جرم مخصوص ظاهری خاک به روش استوانه مدرج (Blake & Hartge, 1986)، کربن خاک به روش واکلی و بلک (Nelson & Sommers, 1982)، نیتروژن خاک با روش کج‌دال (Bremner & Mulvaney, 1982)، اسیدیته در گل اشباع (Thomas, 1996)، هدایت الکتریکی در عصاره اشباع (Rhoades, 1976)، ظرفیت تبادل کاتیونی با روش استات سدیم (Chapman, 1965)، میانگین وزنی قطر خاکدانه با روش

1 Transect

الک تر (Kemper & Rosenau, 1986) و درصد رطوبت اشباع^۱ خاک با استفاده از استفاده از روش وزنی اندازه‌گیری گردید.

ارزیابی شاخص کیفیت خاک^۲ (SQI)

شاخص کیفیت خاک‌های مورد مطالعه در طی سه مرحله محاسبه گردید. مرحله اول شامل شناسایی و انتخاب حداقل مجموعه داده‌ها (MDS^۳) از متغیرهایی (نشانگر^۴) که به بهترین نحو عملکردها و فرآیندهای خاک را نشان می‌دهند. مرحله دوم شامل امتیازدهی به نشانگرهای MDS بر اساس عملکرد آن‌ها و مرحله سوم ادغام نشانگرهای امتیازدهی شده و تبدیل آن به شاخص کیفیت خاک (Andrews, Karlen & Mitchell, 2002).

در گام اول به منظور کاهش تعداد متغیرها و تعیین مؤثرترین آن‌ها از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA^۵) استفاده گردید. روش PCA روشی است که متغیرهای موجود در یک فضای چندبعدی همبسته را به یک مجموعه از مؤلفه‌های غیرهمبسته خلاصه می‌کند و هر یک از آن‌ها ترکیب خطی از متغیرهای اصلی می‌باشند. مؤلفه‌های غیرهمبسته به دست آمده مؤلفه‌های اصلی (PC^۶) نامیده می‌شوند که از بردارهای ویژه ماتریس کوواریانس یا ماتریس همبستگی متغیرهای اصلی به دست می‌آیند. اولین مؤلفه بیشترین اطلاعات را با خود به همراه دارد و از نقطه نظر آماری بیشترین واریانس را توضیح می‌دهد. مؤلفه دوم بیشترین اطلاعات باقیمانده که توسط مؤلفه اول توضیح داده نشده است را بیان می‌کند و با انتخاب چند مؤلفه اصلی اول، سایر مؤلفه‌ها از محاسبات بعدی حذف می‌شوند. بر اساس معیار ارزش ویژه^۷ پیشنهاد شده توسط کیسر (Kaiser, 1960) مؤلفه‌هایی با ارزش ویژه بزرگ‌تر یا مساوی یک انتخاب می‌شوند. در هر مؤلفه، وزن‌های داده شده به هر متغیر (بارگذاری مؤلفه^۸) نشان‌دهنده سهم متغیر در هر مؤلفه است. متغیری که دارای بیشترین وزن باشد به همراه متغیرهایی که دارای اختلاف کمتر از ۱۰ درصد مقدار با آن باشند و یا دارای بار عاملی ≤ 0.50 برای MDS انتخاب شدند. در صورت وجود بیش از یک متغیر در هر مؤلفه از ضرایب همبستگی چند متغیره^۹ استفاده شد. به‌طوری‌که اگر متغیرهای با وزن بالا با یکدیگر همبستگی نداشتند، تمام متغیرها برای MDS انتخاب شدند و در صورت وجود همبستگی بین متغیرها، متغیر با بیشترین وزن انتخاب گردید (Andrews et al., 2002).

1 Saturated water content

2 Soil quality index

3 Minimum data set

4 Indicator

5 Principal component analysis

6 Principal component

7 Eigenvalue

8 Component loading

9 Multivariate correlation coefficients

در گام دوم از توابع امتیازدهی غیرخطی^۱ برای تبدیل نشانگرهای MDS به امتیازهای بدون واحد در دامنه صفر تا یک استفاده شد. معمولاً از سه شکل توابع امتیازدهی برای امتیازدهی نشانگرها استفاده می‌شود که شامل منحنی امتیازدهی سیگموئید برای شیب‌های مثبت (بیشتر-بهتر^۲)، منحنی امتیازدهی سیگموئید برای شیب‌های منفی (کمتر-بهتر^۳) و تابع دامنه بهینه^۴. در مطالعه حاضر، متغیرهای با وزن بالا به‌دست‌آمده از روش PCA بر اساس تابع «بیشتر-بهتر» عمل کردند. منحنی امتیازدهی سیگموئید زیر برای امتیازدهی به نشانگرهای MDS استفاده شد (رابطه ۱) (Bastida, Moreno, Hernández & García, 2006):

$$Y = \frac{a}{(1 + (\frac{X}{X_0})^b)} \quad (1)$$

که در آن Y نشان دهنده امتیاز غیر خطی هر نشانگر، a حداکثر مقدار به‌دست‌آمده توسط تابع (در مطالعه حاضر، a = ۱)، X مقدار نشانگر انتخاب شده، و X₀ مقدار متوسط هر نشانگر. b شیب معادله است (b = -۲/۵) برای منحنی‌های «بیشتر-بهتر».

در نهایت امتیازات نشانگرهای به‌دست‌آمده با استفاده از رابطه (۲) زیر به یک شاخص کیفیت تجمعی تبدیل شدند (Armenise et al., 2013).

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i S_i \quad (2)$$

که در آن W_i ضریب وزنی مشتق شده از PCA و S_i امتیاز غیر خطی هر نشانگر است. لازم به ذکر است قبل از انجام تجزیه مؤلفه‌های اصلی به منظور حصول اطمینان از مناسب بودن داده‌ها از ضریب کایزر-میر-اولکین استفاده گردید. این ضریب بین صفر و یک در نوسان است، در صورتی که این ضریب کمتر از ۰/۵ باشد، داده‌ها برای انجام روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی مناسب نخواهند بود و اگر مقادیر این ضریب بین ۰/۵ تا ۰/۶۹ باشد تناسب داده‌ها متوسط و اگر بزرگ‌تر از ۰/۷ باشد همبستگی‌های موجود در بین داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب خواهد بود. همچنین جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها (در سطح ۵ درصد) از آزمون t-test مستقل استفاده شد.

مدل رگرسیون چند متغیره

به‌منظور برقراری ارتباط بین مقدار کربن آلی خاک در هر عمق با ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی خاک‌ها از روش رگرسیون گام به گام استفاده گردید. در این روش ویژگی‌های خاک به‌ترتیب و به‌صورت گام به گام وارد مدل رگرسیونی می‌شوند به‌طوری که اولین متغیر مستقل (بر اساس ملاحظات آماری یعنی بالاترین ضریب همبستگی) وارد تحلیل می‌شود و چنانچه با ورود متغیر جدید، معنی‌داری خود را از دست داده باشد، از معادله

1 Non-linear scoring functions

2 More is better

3 Less is better

4 Optimal range

خارج می شود (Johnson & Wichern, 1988). در نهایت اعتبارسنجی هر یک از مدل ها بر اساس ضریب تبیین تصحیح شده (Radj) و خطای معیار تخمین (SEE^1) مورد بررسی قرار گرفت. کلیه تجزیه و تحلیل های آماری با استفاده از نرم افزار SPSS 18 انجام شد.

نتایج و بحث

ارزیابی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی

نتایج مقایسه میانگین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از آزمون t-test مستقل در سطح ۵ درصد نشان از وجود تفاوت معنی دار بین ویژگی های خاک در دو سیستم کاربری داشت (جدول ۱). مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی ($15/65 \text{ cmolc kg}^{-1}$)، کربن آلی ($1/62 \%$)، نیتروژن کل ($0/15 \%$)، رس ($23/58 \%$)، رطوبت اشباع ($41/16 \%$)، میانگین وزنی قطر خاکدانه ($2/32 \text{ mm}$) به طور معنی داری در کاربری مرتع بالاتر از زراعی بود. در حالی که مقادیر اسیدیته ($7/34$)، هدایت الکتریکی ($0/39 \text{ dS m}^{-1}$)، شن ($55/65 \%$)، کربنات کلسیم معادل ($7/43 \%$) و جرم مخصوص ظاهری خاک ($1/16 \text{ g cm}^{-3}$) در کاربری زراعی به طور معنی داری بالاتر از کاربری مرتع دست نخورده بود. با تغییر کاربری زمین از مرتع به خاک زراعی مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی، کربن آلی، نیتروژن کل، رس، رطوبت اشباع، میانگین وزنی قطر ذرات خاک و سیلت به ترتیب $13/54$ ، $18/51$ ، $26/66$ ، $4/79$ ، $19/16$ ، $56/03$ و $2/29$ درصد کاهش یافت و مقادیر اسیدیته، هدایت الکتریکی، شن، کربنات کلسیم و جرم مخصوص ظاهری به ترتیب $6/99$ ، $25/80$ ، $0/05$ و $23/62$ و $33/33$ درصد افزایش یافت. افزایش عملیات خاکورزی در زمین های زراعی سبب افزایش فعالیت های میکروبی و به تبع آن افزایش تجزیه ماده آلی خاک و در نهایت کاهش درصد ماده آلی خاک را به همراه دارد (Szostek, Szpunar-Krok, Pawlak, Stanek-Tarkowska & Ilek, 2022).

وقتی زمین های مرتعی زیر کشت برده می شوند مقدار کربن آلی خاک شروع به کاهش می کند و این کاهش بستگی به عوامل اقلیمی و شدت کشت و زرع دارد. از سوی دیگر عدم وجود پوشش گیاهی در سطح خاک باعث افزایش فرسایش خاک و تخلیه بیشتر مواد آلی و ذرات ریز خاک (رس و سیلت) از سطح خاک های زراعی می شود (Zhao et al., 2020). تغییر کاربری اراضی باعث ایجاد تغییرات زیادی در خصوصیات خاک از جمله کاهش کیفیت آن می شود و آن را مستعد به فرسایش می کند (Szilassi et al., 2006). کاهش در مواد آلی، ذرات رس و سیلت خاک می تواند منجر به کاهش پایداری خاکدانه ها و افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک در خاک های زراعی نسبت به مرتعی باشد. در اثر تبدیل مراتع به زمین زراعی، خاکدانه ها به ذرات ریزتر تبدیل می شوند و جای گرفتن این ذرات در خلل و فرج خاک باعث افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک می شود. همچنین هدررفت مواد آلی نیز باعث افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک می گردد (Vanaee, Karami, Joneydi jafari & Nabialahi, 2017).

¹ Standard error of estimate

کله و همکاران (Keller, Sandin, Colombi, Horn & Or, 2019)، بیان نمودند که ماشین‌آلات کشاورزی و فعالیت‌های شدید زراعی موجب تراکم خاک سطحی و افزایش جرم مخصوص ظاهری در زمین‌های کشاورزی می‌شوند. عملیات زراعی خاکدانه‌ها را شکسته و درنهایت باعث افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک می‌شوند (Nawaz, Bourrie & Trolard, 2013). فعالیت زراعی معمولاً کربن آلی خاک را کاهش می‌دهد و تغییر کاربری منجر به کاهش کربن آلی و ازت کل موجود در خاک می‌گردد (Carter, Parton, Rowland, Schultz & Steed, 1993). حاج عباسی و همکاران (Hajabbasi, Besalatpour & Melali, 2008) در طی مطالعات خود بر روی خاک‌های جنوب و جنوب‌غربی اصفهان اذعان داشتند که در اثر تبدیل مراتع به اراضی کشاورزی، هدایت الکتریکی خاک ۴۱ درصد افزایش یافته اما جرم مخصوص ظاهری و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها تغییر معنی‌داری نکرده است و تغییر کاربری باعث کاهش کیفیت و افزایش تخریب خاک شده است. حرکت دام در سطح مرتع باعث مدفون شدن بیشتر فضولات و لاشبرگ می‌شود که باعث افزایش مقدار نیتروژن در خاک مرتع نسبت به زمین زراعی می‌گردد (Vanaee et al., 2017). خاک مرتع نسبت به خاک زراعی مواد آلی بیشتری دارد و از آنجا که قسمت عمده نیتروژن به‌صورت ترکیب با مواد آلی است (Alori, Glick & Babalola, 2017)، بدین‌ترتیب مقدار نیتروژن در خاک مرتع نسبت به زراعی بیشتر بود. ظرفیت تبادل کاتیونی یکی از ویژگی‌های خاک است که به قدرت نگهداری مواد غذایی در خاک مخصوصاً نگهداری کاتیون‌ها مرتبط می‌شود. این ویژگی بیشتر تحت تأثیر میزان ماده آلی، مقدار و نوع رس و PH خاک قرار می‌گیرد (Abera & Belachew, 2011). از آنجا که ماده آلی دارای ظرفیت تبادل کاتیونی بالا می‌باشد با افزایش غلظت آن در خاک، میزان ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نیز افزایش می‌یابد (Golchin & Asgari, 2008). از آنجا که مرتع بکر دارای کربن آلی بیشتری نسبت به زمین زراعی است، بالاتر بودن ظرفیت تبادل کاتیونی در مرتع بکر نسبت به زمین زراعی قابل‌انتظار بود. میزان ظرفیت تبادل کاتیونی همچنین تحت تأثیر میزان و نوع رس قرار می‌گیرد و خاک‌های با رس بیشتر و مخصوصاً اگر رس از نوع ۲:۱ باشد به‌دلیل عرضه بار منفی بیشتر، ظرفیت تبادل کاتیونی بیشتری دارند (Durães, Novo, Candeias & Da Silva, 2018). در اراضی کشاورزی فرسایش خاک و هدر رفت رس به‌دلیل کمبود مواد آلی و شکستن خاکدانه‌ها با عملیات خاکورزی سنتی تشدید می‌شود و این امر به هدر رفت رس و در نتیجه کاهش میزان ظرفیت تبادل کاتیونی خاک منجر می‌شود (Ordoñez-Morales, Cadena-Zapata, 2019). Zermeno-González & Campos-Magaña, 2019). رس و هوموس از جمله اجزاء معدنی و آلی تشکیل‌دهنده خاک هستند که ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک آن را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. بنابراین با تغییر مقدار این اجزاء در خاک در اثر مدیریت‌های مختلف، ویژگی‌های مرتبط با کیفیت خاک که به‌طور مستقیم و غیر مستقیم تحت تأثیر رس و هوموس هستند نیز تغییر می‌کند (Ndzelu et al., 2021).

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مرتعی و زراعی مورد مطالعه

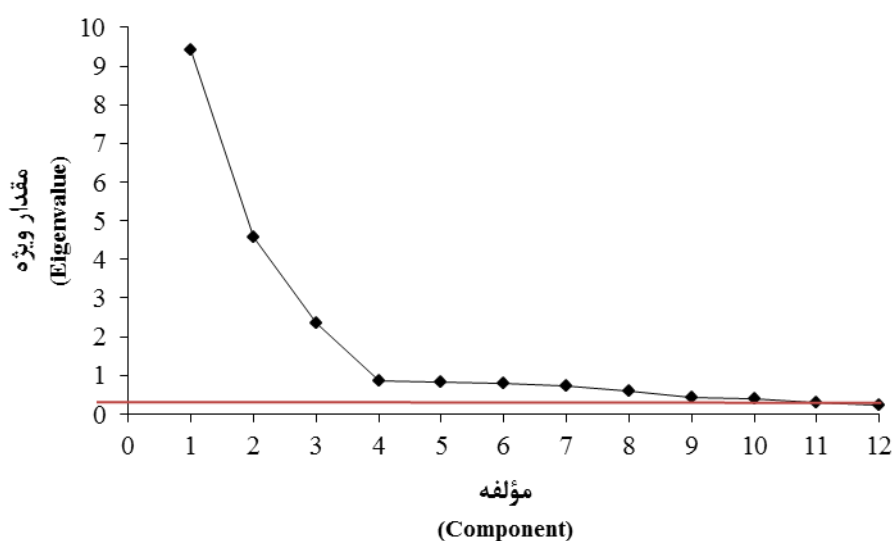
Table 1- Some physical and chemical properties of the studied rangeland and agricultural soil

Sig	t	خاک زراعی (Agricultural soil)	خاک مرتع (Rangeland soil)	واحد (Unit)	ویژگی خاک (Soil properties)
0.03	3.15	7.34±0.11	6.86±0.12		اسیدیته (Acidity)
0.02	2.73	0.04±0.39	0.3±0.31	m ⁻¹ dS	هدایت الکتریکی (Electrical Conductivity)
0.04	7.99	0.52±13.53	0.47±15.65	cmol _c kg ⁻¹	ظرفیت تبادل کاتیونی (Cation Exchange)
0.01	8.68	0.14±1.32	0.12±1.62	%	کربن آلی (Organic Carbon)
0.01	3.67	0.02±0.11	0.03±0.15	%	نیتروژن کل (Total Nitrogen)
0.04	11.47	0.11±7.43	0.21±6.01	%	کربنات کلسیم (Calcium Carbonate)
0.04	5.73	2.21±33.27	1.57±41.16	%	رطوبت اشباع (Field Capacity)
0.03	2.43	0.04±1.16	0.07±0.87	g cm ⁻³	جرم مخصوص ظاهری (Bulk Density)
0.03	6.20	0.21±1.02	0.32±2.32	mm	میانگین وزنی قطر خاکدانه (Mean Weight Diameter of Soil Aggregates)
0.02	1.37	0.76±22.45	23.58±1.05	%	رس (Clay)
0.07	1.09	0.72±21.75	22.26±0.64	%	سیلت (Silt)
0.03	3.73	1.76±55.65	1.85±54.08	%	شن (Sand)
		لوم رسی شنی Sandy clay loam	لوم رسی شنی Sandy clay loam		بافت (Texture)

ارزیابی شاخص کیفیت خاک

اثرات نوع کاربری بر کیفیت خاک با محاسبه SQI ارزیابی شد. با توجه به ۱۲ ویژگی شیمیایی و فیزیکی خاک که قبلاً ذکر شد، تجزیه مؤلفه اصلی دوازده مؤلفه ایجاد کرد. بر اساس رابطه کیسر سه مؤلفه اول دارای مقادیر ویژه بزرگتر از یک بودند و مقادیر ویژه از مؤلفه سوم به بعد دارای مقادیر کمتر از یک بودند. در نتیجه سه مؤلفه اول بعنوان مؤلفه‌های اصلی حفظ شدند (شکل ۲). در مؤلفه اول کربن آلی دارای بالاترین بار عاملی ($0.50 \leq$) و از نقطه نظر آماری ۵۸/۷۹ درصد از واریانس کل را توضیح می‌دهد، در نتیجه به عنوان نشانگر برای مجموعه حداقل داده (MDS) انتخاب گردید (جدول ۲). در مؤلفه دوم بیشترین وزن مربوط به متغیرهای ظرفیت تبادل کاتیونی و هدایت الکتریکی می‌باشد که در مجموع ۲۶/۱۵ درصد از واریانس کل را نشان می‌دهند. با توجه به عدم وجود همبستگی معنی‌دار بین این دو متغیر (جدول ۳)، هر دو متغیر برای MDS انتخاب گردیدند. در مؤلفه سوم نیز همبستگی معنی‌داری بین درصد رس و اسیدیته خاک مشاهده نشد (جدول ۲)، بنابراین هر دو متغیر برای MDS انتخاب گردیدند. در مجموع پنج متغیر کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی،

اسیدیته، هدایت الکتریکی و رس خاک به‌عنوان نشانگرها برای MDS انتخاب شدند. استفاده از شاخص کیفیت خاک به‌عنوان ابزاری مفید جهت تعیین و مقایسه کیفیت خاک در بسیاری از مطالعات مورد تأیید قرار گرفته است. شهاب آرخازلو و همکاران (Shohab Arkhazloo, Emami, Haghnia & Karimi, 2011) در پژوهش خود نشان دادند از میان ۱۸ ویژگی مورد بررسی خاک یا کل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک ویژگی‌های درصد کربن آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، درصد خاکدانه‌های پایدار در آب، درصد آهک معادل، فاکتور فرسایش‌پذیری خاک معادله جهانی فرسایش خاک و شاخص پایداری خاکدانه‌ها دارای ارزش ویژه بزرگ‌تر از یک بوده و بیش از ۹۵ درصد تغییرات را نشان دادند. مقامی مقیم و همکاران (Maghami Moghim, Karimi, Bagheri Bodaghabadi & Emami, 2022) اذعان داشتند از بین ۱۲ ویژگی مؤثر بر کیفیت خاک، ۴ ویژگی قابلیت هدایت الکتریکی، ماده آلی، درصد رس و PH به روش PCA به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک در لایه شخم در نظر گرفته شدند. یغمائی‌ان مه‌بادی و همکاران (Yaghmaeian Mahabadi, Fayyaz, Sabouri & Shirinfekr, 2021) با استفاده از روش تجزیه مؤلفه اصلی (PCA)، از میان ۱۵ ویژگی خاک، شش ویژگی شامل پتاسیم قابل جذب، کربن آلی، PH، فسفر قابل جذب، روی قابل جذب و تعداد نماتد به‌عنوان حداقل نشانگرهای مؤثر بر کیفیت خاک انتخاب کردند.



شکل ۲- نمودار بازویی بدست آمده برای ۱۲ مؤلفه بدست آمده با روش PCA

Fig.2. Scree plot obtained for the 12 components derived using the PCA method

جدول ۲- نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی برای ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک کاربری‌های مورد مطالعه

Table 2- Results of principal component analysis for the characteristics affecting soil quality in the studied land uses

مؤلفه سوم Principal) (component, PC3	مؤلفه دوم Principal) (component, PC2	مؤلفه اول Principal) (component, PC1	متغیرها (Variables)
0.56	0.19	0.12	PH
-0.09	-0.53	0.22	EC
0.34	0.62	-0.11	CEC
0.12	0.36	0.72	OC
0.18	0.11	0.34	TN
-0.31	0.27	0.09	CaCO ₃
0.06	0.32	-0.15	SWC
0.33	0.16	0.34	BD
0.31	0.11	0.29	MWD
0.75	0.13	0.18	Clay
0.05	0.16	0.08	Silt
0.15	0.04	-0.13	Sand
2.34	4.56	9.43	مقدار ویژه (Eigenvalue)
15.06	26.15	58.79	درصد (Percent)
82.12	76.25	58.79	درصد تجمعی (Cumulative) (percentage)

متغیرهای برجسته شده مربوط به نشانگرهای انتخاب شده برای MDS می‌باشد.

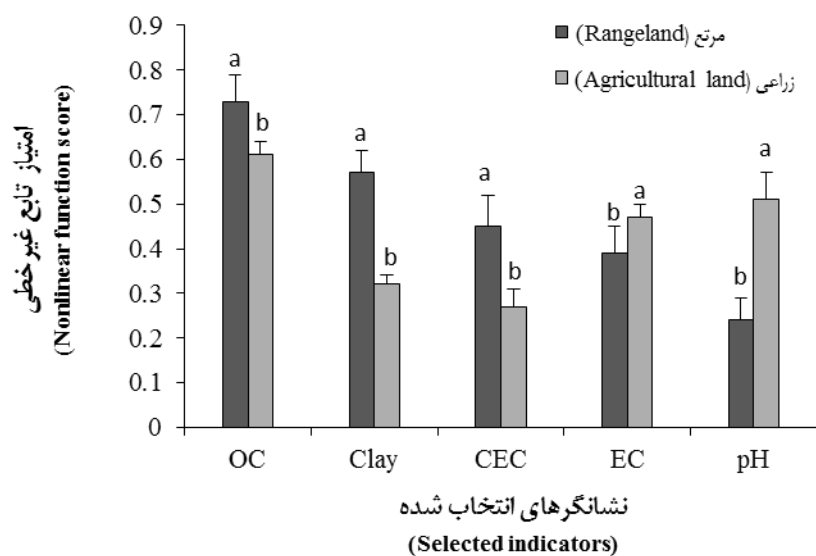
The highlighted variables correspond to the selected markers for MDS.

جدول ۳- ماتریس همبستگی بین ویژگی‌های خاک در کاربری‌های مورد مطالعه

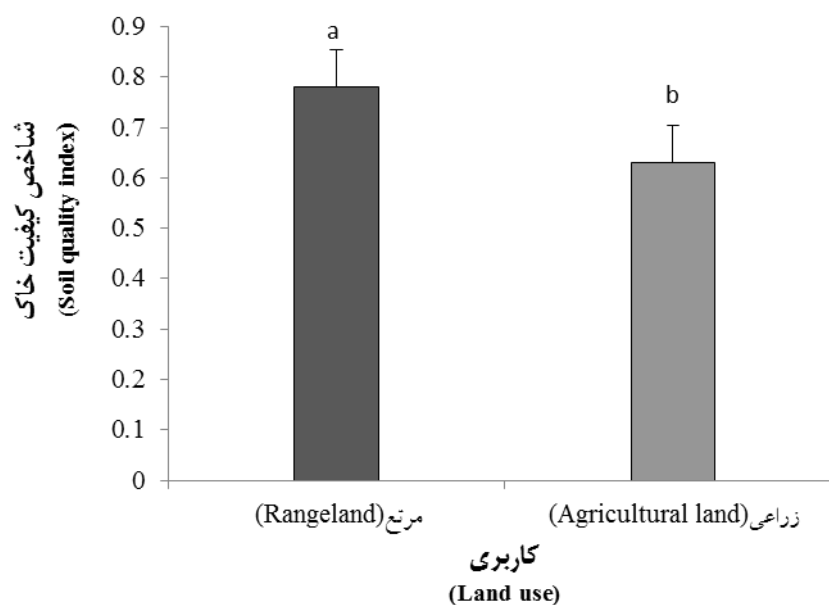
Table 3- Correlation matrix between soil properties in the studied land uses

Silt	Clay	MWD	BD	SWC	CaCO ₃	N	OC	CEC	EC	pH	ویژگی‌های خاک (Soil properties)
										0.11	EC
									0.13	0.43*	CEC
								0.58*	0.23	0.68**	OC
							0.39*	0.21	0.12	0.09	N
						-0.04	0.03	-0.11	0.29	0.17	CaCO ₃
					0.17	0.25	0.19	0.18	0.04	-0.27	SWC
				0.48*	0.26	0.14	0.08	0.14	-0.16	0.08	BD
			0.28	0.55*	-0.23	0.11	0.15	0.38*	0.31	0.24	MWD
		0.51	0.43*	0.09	0.14	0.06	0.12	0.47*	0.23	0.04	Clay
	0.11	0.27	0.16	0.18	0.11	0.11	0.07	0.21	0.03	0.11	Silt
0.16	0.18	0.14	0.19	0.10	0.17	0.04	0.19	0.12	0.08	-0.06	Sand

شکل ۳ مقادیر امتیازهای به‌دست آمده با استفاده از تابع امتیازدهی غیرخطی برای هر یک از نشانگرهای انتخاب شده (اسیدیته، رس، ظرفیت تبادل کاتیونی، کربن آلی و هدایت الکتریکی) را نشان می‌دهد. نتایج مقایسه میانگین توابع امتیازدهی غیرخطی نشانگرهای MDS با استفاده از آزمون t-test مستقل در سطح ۵ درصد بیانگر اختلاف معنی‌دار بین امتیازهای هر نشانگر در دو کاربری مختلف بود. مقادیر امتیاز نشانگر کربن آلی خاک از ۰/۷۳ برای خاک مرتع تا ۰/۶۱ برای خاک زراعی متغیر بود. مقادیر رس، ظرفیت تبادل کاتیونی، اسیدیته و هدایت الکتریکی نیز به ترتیب ۰/۵۷، ۰/۴۵، ۰/۳۹ و ۰/۲۴ برای خاک مرتع و ۰/۴۷، ۰/۳۲، ۰/۲۷ و ۰/۴۱ برای خاک، رس و ظرفیت تبادل کاتیونی، هدایت الکتریکی و اسیدیته بالاترین امتیازات را در خاک مرتع داشتند. در حالی که در خاک زراعی به ترتیب بالاترین امتیازات مربوط به کربن آلی خاک، اسیدیته، هدایت الکتریکی، رس و ظرفیت تبادل کاتیونی بود. همچنین نتایج مقایسه میانگین مقادیر شاخص کیفیت خاک به‌دست‌آمده برای دو کاربری مرتع و زراعی با استفاده از آزمون t-test مستقل در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری را نشان داد (شکل ۴). شاخص کیفیت خاک مرتع دست‌نخورده (۰/۷۸) به‌طور معنی‌دار بالاتر از شاخص کیفیت خاک زراعی (۰/۶۳) بود. کی و همکاران (2009, Qi et al.)، شاخص کیفیت خاک را به چهار درجه تقسیم کردند. درجه I ($\leq 0/8$) نشان‌دهنده مناسب‌ترین کیفیت خاک می‌باشد، درجه II ($0/8 - 0/7$) بیانگر خاک با کیفیت مناسب اما دارای محدودیت‌هایی برای رشد گیاه، درجه III ($0/7 - 0/6$) بیانگر خاک با کیفیت متوسط و درجه IV ($\geq 0/6$) بیانگر کیفیت ضعیف خاک و وجود شدیدترین محدودیت‌های رشدی برای گیاهان می‌باشد. براساس تقسیم‌بندی فوق خاک مرتع جزء خاک‌های با درجه کیفیت II و خاک زراعی جزء خاک‌های با درجه کیفیت III می‌باشد. لیو و همکاران (2014, Liu et al.)، در مطالعه خود نشان دادند بین شاخص کیفیت خاک و عملکرد برنج همبستگی معنی‌داری وجود دارد که انتخاب ویژگی‌های خاک به‌عنوان MDS توانسته وضعیت خاک برای تولید برنج را به‌خوبی ارزیابی نماید. نقش کلیدی کربن آلی به‌عنوان عامل مهم تعیین‌کننده کیفیت خاک در تعدادی از مطالعات مشخص شد (2013, Armenise et al.; 2017, Raiesi). تبدیل مراتع و کشت و کار طولانی-مدت در خاک‌های مرتعی باعث کاهش محتوای کربن خاک می‌شود. از جمله دلایل این کاهش می‌تواند مربوط به کاهش ورودی‌های کربن از طریق اندام هوایی و زیرزمینی گیاه و همچنین افزایش تجزیه مواد آلی موجود در خاک به‌واسطه عملیات خاک‌ورزی شدید باشد (2011, Mazzoncini, Sapkota, Barberi, Antichi & Risaliti). اهمیت کربن آلی به‌عنوان یک نشانگر MDS را می‌توان به اثرات مستقیم و غیرمستقیم آن بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نسبت داد. ترکیبات آلی ساختار خاک را بهبود می‌بخشند و ترکیب شیمیایی خاک را از طریق تعامل با جوامع میکروبی تغییر می‌دهند که منجر به افزایش کیفیت خاک می‌شوند (Zhang et al., 2022).



شکل ۳- مقادیر امتیازهای داده شده به نشانگرهای انتخاب شده برای MDS با استفاده از تابع غیرخطی
 Fig.3. Scores assigned to the selected indicators for MDS using a nonlinear function



شکل ۴- مقادیر شاخص های کیفیت خاک اندازه گیری شده برای خاک های مرتع و زراعی
 Fig.4. Measured soil quality indices for rangeland and agricultural soils

تعیین عوامل مؤثر بر تغییرات کربن خاک

با توجه به نقش اصلی کربن آلی خاک بر شاخص کیفیت خاک، رگرسیون چندمتغیره خطی گام به گام برای ارزیابی الگوهای ارتباطی بین کربن آلی خاک و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده شد (جدول ۴).

جدول ۴- ارتباط مقدار کربن با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در دو کاربری مورد مطالعه

Table 4- Relationship between carbon content and soil physical and chemical properties in the two studied land uses

اعتبارسنجی (Validation)		معادلات خطی (linear equation)	کاربری (land use)
SEE	R _{adj}		
0.24	0.78	$-OC = 7.21 + 1.68 CEC + 0.93 Clay + 0.72 MWD$ $s\theta 0.24 Bd + 0.04$	مرتع (Rangeland)
0.21	0.72	$OC = 1.21 - 0.48EC - 0.13 pH$	زراعی (Agricultural land)

روابط به‌دست‌آمده بین کربن آلی خاک و متغیرها با توجه به نوع کاربری تفاوت معنی‌داری داشتند (۰/۰۱ < P) (جدول ۴). در مورد خاک مرتع، متغیرهای ظرفیت تبادل کاتیونی، درصد رس، میانگین وزنی قطر خاکدانه و درصد رطوبت اشباع خاک تأثیر مثبت و معنی‌داری و جرم مخصوص ظاهری تأثیر منفی و معنی‌داری بر کربن آلی خاک داشتند. همچنین شیب خط بدست آمده برای هر یک از متغیرها در خاک مرتعی نشان داد که کربن آلی خاک بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات ظرفیت تبادل کاتیونی (۱/۶۸) داشت. برای خاک زراعی ارتباط منفی و معنی‌داری بین کربن آلی خاک با متغیرهای هدایت الکتریکی و اسیدیته مشاهده شد. همچنین در این خاک بیشترین حساسیت کربن آلی نسبت به هدایت الکتریکی (شیب ۰/۴۸) بدست آمد. تعادل دینامیکی بین ورودی و خروجی کربن عمدتاً توسط شرایط اقلیمی و موقعیت توپوگرافی منطقه کنترل می‌شود (Jakšić et al., 2021). ولی با توجه به یکسان بودن موقعیت مناطق نمونه‌برداری شده اثر فاکتورهای اقلیمی و توپوگرافی بر تغییرات کربن خاک در مدیریت مرتع و زراعی یکسان فرض شده است. بنابراین عامل اصلی تغییرات کربن آلی خاک در مناطق مورد مطالعه مدیریت کاربری منطقه می‌باشد. ارتباط مثبت معنی‌دار بین کربن آلی خاک در کاربری مرتع با درصد رس و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک می‌تواند به دلیل فراوانی تشکیل کمپلکس‌های آلی-معدنی باشد. اتصال گروه‌های عاملی کربن آلی خاک به ذرات رس در بلند مدت سبب کاهش تجزیه‌پذیری و افزایش تثبیت کربن آلی می‌گردد (Reichenbach et al., 2021). همبستگی به‌دست آمده بین درصد رس خاک و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نشان‌دهنده نقش رس خاک در میزان ظرفیت تبدالی خاک دارد (جدول ۳). ویژگی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شاخص خوبی برای تعیین کیفیت خاک بوده و مقدار آن بسته به میزان و نوع رس متغیر است. رس‌ها به علت دارا بودن سطح ویژه زیاد و باردار بودن نقش مهمی در ظرفیت تبادل کاتیونی خاک دارند و با افزایش مقدار رس، مقدار این شاخص نیز افزایش می‌یابد (Hezarjaribi, Nosrati, Karizak & Abdollahnezhad, 2013). از سوی دیگر افزایش عملیات خاکورزی به دلیل تخریب کمپلکس‌ها

آلی-معدنی موجب افزایش در معرض قرارگیری کربن آلی در برابر ریزجانداران خاک می شود. همچنین تسریع فرسایش بادی و آبی به دلیل کاهش پوشش گیاهی نیز از دیگر عوامل مهم در افزایش از دست رفتن کربن آلی خاک به همراه محصولات حاصل از هوازدگی سنگها نظیر ذرات سیلت و رس در خاک های زراعی می باشد. مارتینز-منا و همکاران (Martinez-Mena, Lopez, Almagro, Boix-Fayos & Albaladejo, 2008) در بررسی اثر تغییر کاربری جنگل به کشاورزی بیان نمودند که میزان هدر رفت خاک هفت برابر افزایش و میزان مواد آلی لایه سطحی خاک ۵۰ درصد کاهش پیدا کرده است. از دیگر اثرات افزایش رس و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک می توان به اثرات آن ها بر افزایش شاخص ساختاری MWD و همچنین کاهش BD (جدول ۱) اشاره نمود. افزایش خاکدانه سازی در خاک های مرتعی می تواند سبب افزایش نفوذ آب به خاک و ظرفیت ذخیره آب شود که به تبع آن افزایش پوشش گیاهی و افزایش ورود کربن به خاک را موجب می شود. ارتباط مثبت و معنی دار به دست آمده بین کربن آلی خاک مرتع با MWD، BD و درصد رطوبت اشباع خاک و همچنین نتایج همبستگی به دست آمده بین رطوبت اشباع خاک با MWD و BD نیز تا حدودی تأییدکننده این موضوع می باشد.

ارتباط منفی و معنی دار بین کربن آلی خاک زراعی با اسیدیته و هدایت الکتریکی خاک نیز بیان کننده نقش عمده این دو عامل در کاهش کربن آلی در خاک زراعی می باشد. املاح محلول موجود در خاک به دلیل ایجاد محدودیت در استقرار و رشد و توسعه پوشش گیاهی نقش بسیار تعیین کننده ای بر روی درصد پوشش گیاهی دارد، چنانچه مطالعات گسترده ای این موضوع را تأیید می نمایند (Chahouki, Ahvazi & Azarnivand, 2011; Sheidai Karkaj, Sepehry, Barani & Motamedi, 2017). شوری خاک به موجب اثر آن بر کاهش مقدار کلروفیل و کاهش جذب دی اکسیدکربن توسط گیاه سبب کاهش ظرفیت فتوسنتزی گیاه می شود. در نهایت این کاهش در ظرفیت فتوسنتزی گیاه سبب کاهش حجم ورودی لاشبرگ به خاک می شود (Shrivastava & Kumar, 2015). یکی از دلایل اصلی افزایش سطح شوری در خاک های مرتعی تحت کشت گندم می تواند مربوط به حذف فصلی پوشش گیاهی از سطح خاک های این مراتع باشد. کاهش سطح پوشش خاک توسط گیاه منجر به افزایش نرخ تبخیر آب از سطح خاک و در نتیجه تجمع بیشتر املاح می شود (Shaygan & Baumgartl, 2022). علاوه بر این، شوری سطحی زمین های زراعی ممکن است به دلیل شرایط غرقابی فصلی با شرایط زهکشی محدود باشد، که در نتیجه افزایش خاک ورزی حاصل شده است (Singh, 2019). از سوی دیگر تجمع این املاح بازی در سطح خاک سبب افزایش اسیدیته خاک در کاربری زراعی می شود. به طوری که افزایش مقادیر کربنات کلسیم به دست آمده در خاک زراعی نسبت به خاک های مرتع می تواند تا حدودی بیانگر افزایش اسیدیته خاک زراعی باشد (جدول ۱). در این خصوص مطالعات مختلفی نشان می دهد اسیدیته خاک به واسطه اثر آن بر تنظیم فعالیت میکروبی خاک میزان کربن خاک را تحت تأثیر قرار می دهد و مقادیر بالای اسیدیته احتمالاً به دلیل تسریع شدن تجزیه کربن خاک یک اثر منفی بر میزان کربن خاک دارد (Ling et al., 2021).

نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین اکثر ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شده در دو کاربری مرتع دست‌نخورده و زراعی وجود داشت، درحالی‌که از بین این ویژگی‌ها تنها پنج ویژگی خاک بعنوان نشانگر برای MDS انتخاب شدند (کربن آلی، درصد رس، ظرفیت تبادل کاتیونی، اسیدیته و هدایت الکتریکی) از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر کیفیت خاک بودند. تبدیل مراتع به مزارع منجر به کاهش کیفیت خاک شد که به وضوح توسط شاخص کیفیت خاک به‌دست‌آمده نشان داده شد. از سوی دیگر نتایج توابع امتیازدهی غیرخطی بیانگر نقش اصلی کربن آلی در افزایش کیفیت خاک مرتعی نسبت به زراعی بود. ارتباط معنی‌داری بین کربن آلی خاک مرتع با متغیرهای ظرفیت تبادل کاتیونی، درصد رس، جرم مخصوص ظاهری، میانگین وزنی قطر خاکدانه و درصد رطوبت اشباع خاک و همچنین ارتباط معنی‌داری بین کربن آلی خاک زراعی با متغیرهای اسیدیته و هدایت الکتریکی نیز با استفاده از روش رگرسیون گام به گام بدست آمد. کاهش حجم ورودی لاشبرگ به خاک و به تبع آن کاهش ورودی کربن آلی به خاک در اثر حذف فصلی پوشش گیاهی از سطح خاک زراعی را می‌توان از دلایل عمده کاهش کیفیت این خاک نسبت به خاک مرتعی بر شمرد. همچنین برداشت فصلی پوشش گیاهی در خاک زراعی می‌تواند به موجب افزایش اسیدیته و هدایت الکتریکی در اثر افزایش نرخ تبخیر آب از سطح خاک، سبب کاهش بیشتر ورودی کربن به این خاک در مقایسه با خاک مرتعی و در نتیجه کاهش کیفیت خاک زراعی شود. به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که نشانگرهای MDS علاوه بر اثرگذاری مستقیم بر کیفیت خاک، می‌توانند از طریق تأثیر بر روی مقدار کربن آلی خاک، به‌طور غیرمستقیم کیفیت خاک را نیز تحت تأثیر قرار دهند.

قدردانی و تشکر

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره «۴۰۵۲۹۳» انجام شده است.

References

- Abbas, F., Hammad, H. M., Ishaq, W., Farooque, A. A., Bakhat, H. F., Zia, Z., ... & Cerdà, A. (2020). A review of soil carbon dynamics resulting from agricultural practices. *Journal of Environmental Management*, 268, 110319. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110319>
- Abera, Y., & Belachew, T. (2011). Effects of landuse on soil organic carbon and nitrogen in soils of Bale, Southeastern Ethiopia. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(1), 229-235 .
- Alori, E. T., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 8, 971 . <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>
- Alves de Castro Lopes, A., Gomes de Sousa, D. M., Chaer, G. M., Bueno dos Reis Junior, F., Goedert, W. J., & de Carvalho Mendes, I. (2013). Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 77(2), 461-472 . <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0191>

- Andrews, S. S., Karlen, D., & Mitchell, J. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 90(1), 25-45. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8)
- Armenise, E., Redmile-Gordon, M., Stellacci, A., Ciccicarese, A., & Rubino, P. (2013). Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research*, 130, 91-98. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.02.013>
- Bai, Z., Caspari, T., Gonzalez, M. R., Batjes, N. H., Mäder, P., Bünemann, E. K., ... & Tóth, Z. (2018). Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 265, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.028>
- Bastida, F., Moreno, J. L., Hernández, T., & García, C. (2006). Microbiological degradation index of soils in a semiarid climate. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(12), 3463-3473. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.06.001>
- Bengtsson, J., Bullock, J. M., Egoh, B., Everson, C., Everson, T., O'connor, T., ... & Lindborg, R. (2019). Grasslands—more important for ecosystem services than you might think. *Ecosphere*, 10(2), e02582. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2582>
- Blake, G. R., & Hartge, K. (1986). Bulk density. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 363-375. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>
- Bremner, J. M., & Mulvaney, C. (1982). Nitrogen—total. *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 595-624. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c31>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., De Goede, R., ... & Brussaard, L. (2018). Soil quality—A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Buraka, T., Elias, E., & Lelago, A. (2022). Soil organic carbon and its' stock potential in different land-use types along slope position in Coka watershed, Southern Ethiopia. *Heliyon*, 8(8), e10261. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10261>
- Carter, M., Parton, W., Rowland, I., Schultz, J., & Steed, G. (1993). Simulation of soil organic carbon and nitrogen changes in cereal and pasture systems of southern Australia. *Soil Research*, 31(4), 481-491. <https://doi.org/10.1071/SR9930481>
- Chahouki, M. A. Z., Ahvazi, L. K., & Azarnivand, H. (2011). Environmental factors affecting distribution of vegetation communities in Iranian rangelands. *Vegetos*, 23(2), 1-15.
- Chapman, H. (1965). Cation-exchange capacity. *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 891-901. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c6>
- Durães, N., Novo, L. A., Candeias, C., & Da Silva, E. F. (2018). Distribution, transport and fate of pollutants. In *Soil Pollution* (29-57). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849873-6.00002-9>
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Bakker, D. C., Hauck, J., ... & Zeng, J. (2022). Global carbon budget 2021. *Earth system science data*, 14(4), 1917-2005. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022>

- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 383-411. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
- Golchin, A., & Asgari, H. (2008). Land use effects on soil quality indicators in north-eastern Iran. *Soil Research*, 46(1), 27-36. <https://doi.org/10.1071/SR07049>
- Hajabbasi, M. A., Besalatpour, A., & Melali, A. R. (2008). Impacts of Converting Rangelands to Cultivated Land on Physical and Chemical Properties of Soils in West and Southwest of Isfahan. *Journal of Water and Soil Science*, 11(42), 525-534. [In Persian] <http://dorl.net/dor/20.1001.1.24763594.1386.11.42.44.8>
- Hezarjaribi, A., Nosrati Karizak, F., & Abdollahnezhad, K. (2013). The Prediction Possibility of Soil Cation Exchange Capacity by Using of Easily Accessible Soil Parameters. *Water and Soil*, 27(4), 712-719. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.28092>
- Jaksic, S., Ninkov, J., Milic, S., Vasin, J., Zivanov, M., Perovic, V., ... & Komlen, V. (2021). Topographic Position, Land Use and Soil Management Effects on Soil Organic Carbon (Vineyard Region of Nis, Serbia). *Agronomy-Basel*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/agronomy11071438>
- Janes-Bassett, V., Davies, J., Rowe, E. C., & Tipping, E. (2020). Simulating long-term carbon nitrogen and phosphorus biogeochemical cycling in agricultural environments. *Science of the Total Environment*, 714, 136599. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136599>
- Johnson, A. R., & Wichern, D. W. (1988). Applied Multivariate Statistical Analysis. *Biometrics*, 44(3), 920. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/dan-667>
- Kaiser, H. F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 141-151. <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>
- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., & Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate stability and size distribution. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 425-442. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>
- Khalil, I. M., Francaviglia, R., & Henry, B. (2019). Strategic management of grazing grassland systems to maintain and increase organic carbon in soils. *Frazão LA.(eds.). CO2 Sequestration*, 45. <http://hdl.handle.net/10197/9672>
- Li, Y., Dong, S., Wen, L., Wang, X., & Wu, Y. (2013). Assessing the soil quality of alpine grasslands in the Qinghai-Tibetan Plateau using a modified soil quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 8011-8022. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3151-1>
- Ling, L., Fu, Y., Jeewani, P. H., Tang, C., Pan, S., Reid, B. J., ... & Xu, J. (2021). Organic matter chemistry and bacterial community structure regulate decomposition processes in post-fire forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 160, 108311. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108311>

- Liu, Z., Zhou, W., Shen, J., He, P., Lei, Q., & Liang, G. (2014). A simple assessment on spatial variability of rice yield and selected soil chemical properties of paddy fields in South China. *Geoderma*, 235, 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.027>
- Maghami Moghim, F., Karimi, A. R., Bagheri Bodaghabadi, M., & Emami, H. (2022). Evaluating the Role of Different Management Systems on Soil Quality Index Using Crop Yield (Case Study: Neyshabour Plain, Iran). *Water and Soil*, 36(1), 95-112. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.2022.74026.1120>
- Martinez-Mena, M., Lopez, J., Almagro, M., Boix-Fayos, C., & Albaladejo, J. (2008). Effect of water erosion and cultivation on the soil carbon stock in a semiarid area of South-East Spain. *Soil and Tillage Research*, 99(1), 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.01.009>
- Mazzoncini, M., Sapkota, T. B., Barberi, P., Antichi, D., & Risaliti, R. (2011). Long-term effect of tillage, nitrogen fertilization and cover crops on soil organic carbon and total nitrogen content. *Soil and Tillage Research*, 114(2), 165-174. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.05.001>
- Nawaz, M. F., Bourrie, G., & Trolard, F. (2013). Soil compaction impact and modelling. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 291-309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
- Ndzelu, B. S., Dou, S., Zhang, X., Zhang, Y., Ma, R., & Liu, X. (2021). Tillage effects on humus composition and humic acid structural characteristics in soil aggregate-size fractions. *Soil and Tillage Research*, 213, 105090. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105090>
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 539-579. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
- Ordoñez-Morales, K. D., Cadena-Zapata, M., Zermeno-González, A., & Campos-Magaña, S. (2019). Effect of tillage systems on physical properties of a clay loam soil under oats. *Agriculture*, 9(3), 62. <https://doi.org/10.3390/agriculture9030062>
- Qi, Y., Darilek, J. L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., & Gu, Z. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149(3-4), 325-334. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.015>
- Rahmanipour, F., Marzaioli, R., Bahrami, H. A., Fereidouni, Z., & Bandarabadi, S. R. (2014). Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. *Ecological Indicators*, 40, 19-26. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.12.003>
- Raiesi, F. (2017). A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. *Ecological Indicators*, 75, 307-320. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.049>
- Raiesi, F., & Beheshti, A. (2014). Soil C turnover, microbial biomass and respiration, and enzymatic activities following rangeland conversion to wheat-alfalfa cropping in a semi-arid climate. *Environmental Earth Sciences*, 72, 5073-5088. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3376-5>

- Raiesi, F., & Riahi, M. (2014). The influence of grazing exclosure on soil C stocks and dynamics, and ecological indicators in upland arid and semi-arid rangelands. *Ecological Indicators*, 41, 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.01.040>
- Reichenbach, M., Fiener, P., Garland, G., Griepentrog, M., Six, J., & Doetterl, S. (2021). The role of geochemistry in organic carbon stabilization against microbial decomposition in tropical rainforest soils. *Soil*, 7(2), 453-475. <https://doi.org/10.5194/soil-7-453-2021>
- Rhoades, J. D. (1976). Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations. *Soil Science Society of America Journal*, 40, 651-655.
- Salek-Gilani, S., Raiesi, F., Tahmasebi, P., & Ghorbani, N. (2013). Soil organic matter in restored rangelands following cessation of rainfed cropping in a mountainous semi-arid landscape. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 96, 215-232. <https://doi.org/10.1007/s10705-013-9587-4>
- Shaygan, M., & Baumgartl, T. (2022). Reclamation of salt-affected land: A review. *Soil systems*, 6(3), 61. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6030061>
- Sheidai Karkaj, E., Sepehry, A., Barani, H., & Motamedi, J. (2017). Soil organic carbon reserve relationship with some soil properties in East Azerbaijan rangelands. *Rangeland*, 11(2), 125-138. [In Persian] <http://rangelandsrm.ir/article-1-475-fa.html>
- Shohab Arkhazloo, H., Emami, H., Haghnia, G., & Karimi, A. R. (2011). Determining most Important Properties for Soil Quality Indices of Agriculture and Range Lands in a some Parts of Southern Mashhad. *Water and Soil*, 25(5). [In Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i-.11256>
- Shrivastava, P., & Kumar, R. (2015). Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi journal of biological sciences*, 22(2), 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.001>
- Singh, A. (2019). Poor-drainage-induced salinization of agricultural lands: Management through structural measures. *Land use Policy*, 82, 463-457. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.12.032>
- Spohn, M., & Giani, L. (2011). Impacts of land use change on soil aggregation and aggregate stabilizing compounds as dependent on time. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(5), 1081-1088. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.01.029>
- Szilassi, P., Jordan, G., Van Rompaey, A., & Csillag, G. (2006). Impacts of historical land use changes on erosion and agricultural soil properties in the Kali Basin at Lake Balaton, Hungary. *Catena*, 68(2-3), 96-108. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.03.010>
- Szostek, M., Szpunar-Krok, E., Pawlak, R., Stanek-Tarkowska, J., & Ilek, A. (2022). Effect of different tillage systems on soil organic carbon and enzymatic activity. *Agronomy*, 12(1), 208. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010208>
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. *Methods of soil analysis: part 3 chemical methods*, 5, 475-490. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>
- Vanaee, F., Karami, P., Joneydi jafari, H., & Nabialahi, K. (2017). Simulation of soil organic carbon dynamic in meadow ecosystems under different management practices using

- CENTURY model. *Rangeland*, 10(4), 439-449. [In Persian]
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20080891.1395.10.4.6.2>
- Vargas, L., Willemsen, L., & Hein, L. (2019). Assessing the capacity of ecosystems to supply ecosystem services using remote sensing and an ecosystem accounting approach. *Environmental Management*, 63, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1110-x>
- Xu, M., Lou, Y., Sun, X., Wang, W., Baniyamuddin, M., & Zhao, K. (2011). Soil organic carbon active fractions as early indicators for total carbon change under straw incorporation. *Biology and Fertility of Soils*, 47, 745-752. <https://doi.org/10.1007/s00374-011-0579-8>
- Yaghmaeian Mahabadi, N., Fayyaz, H., Sabouri, A., & Shirinfekr, A. (2021). Comparison of Soil Quality Evaluation Methods and Their Relationships with Tea Yield in West Guilan Province. *Iranian Journal of Soil Research*, 34(4), 435-450. [In Persian]
<https://doi.org/10.22092/ijsr.2021.351656.551>
- Zhang, Y., Wang, L., Jiang, J., Zhang, J., Zhang, Z., & Zhang, M. (2022). Application of soil quality index to determine the effects of different vegetation types on soil quality in the Yellow River Delta wetland. *Ecological Indicators*, 141, 109116. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109116>
- Zhao, J., Feng, X., Deng, L., Yang, Y., Zhao, Z., Zhao, P., ... & Fu, B. (2020). Quantifying the effects of vegetation restorations on the soil erosion export and nutrient loss on the Loess Plateau. *Frontiers in Plant Science*, 11, 573126. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.573126>
- Zohdi, M., Arzani, H., Javadi, S., Jalili, A., & Khorshidi, G. (2018). Government and range management in Iran (policy, laws and plans). *Applied Ecology & Environmental Research*, 16(4), 4537-4654 http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1604_46374654



Investigating the impact of increasing cultivated area and population growth on the surface water resources of the Mahabad Dam Basin using the WEAP model

Nezamoddin Mahmoudi^a, Hiran Abaghari^{b*}

^a PhD student in watershed management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

^b Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

Article Info

Article history

Received : 31 October 2023

Received in revised form:
5 June 2024

Accepted: 10 June 2024

Available online :
21 March 2025

Keywords:

Population Growth
Scenario
WEAP Model
Water Resources
Management
Mahabad Dam Basin
Agricultural Land
Expansion

Abstract

Today, because of population growth, improvement of public health and welfare, development of industry and growth of economic and agricultural activities, per head water consumption has greatly increased, and due to the deficiency of water and the imbalance between supply and demand, the management of water resources is very complex and important. The WEAP model evaluates the effect of changing the amount of water allocated to different consumers on the economic benefits of water consumption. This advantage is very important, especially when it is necessary to evaluate the long-term effects of changing allocation in water resources. That is why WEAP has been used in this research. The purpose of this research is to investigate the status of water resources in the Mahabad dam and the impact of an increase in demand on meeting the needs. In this research, after collecting and completing the required information, the input file was created and the WEAP model was calibrated for a statistical period. Then, exploitation scenarios for the dam reservoir were developed and implemented, and the obtained results were evaluated. The simulated scenarios include the increase of cultivated area by 10, 20, and 30 percent and the population growth scenario. The results show that according to the reference scenario, Mahabad Dam will face a shortage of 18.8 million cubic meters, and according to the scenarios S4, S3, S2, S1, it will face a shortage of 30, 41, 52, and 21 million cubic meters, respectively. The selected scenario is the reference scenario that provides better conditions for the reservoir in terms of reliability and supply of water demands, and the maximum volume of water stored in the reservoir.

*.Corresponding author : Dr. Hiran Abaghari

E-mail address: h.abghari@urmia.ac.ir

How to cite this article: Mahmoudi, N., & Abaghari, H. (2025). Investigating the impact of increasing cultivated area and population growth on the surface water resources of the Mahabad Dam Basin using the WEAP model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), pp. 299-324, DOI:https://doi.org/10.22067/geoe.h.2024.85119.1425



©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

Water resource allocation determines consumption priorities in various sectors, such as drinking, industry, and agriculture. The use of effective solutions for optimal water resource allocation and simulation of the decision-making process in prioritizing development and sustainable use of water and soil resources is of great importance. Therefore, many regions of the world face serious challenges in managing freshwater resources. Limited water resource allocation has led to environmental concerns, planning for water diversity, and the need for sustainable water consumption strategies. Supply-oriented simulation models are also always insufficient for examining water resource management options (Loucks and van Beek, 2017). In the past decade, an integrated approach to water resource development has emerged that directs water supply methods towards demand management, water quality preservation, and ecosystem protection. Due to population growth, improvements in public health and welfare, industrial expansion, and growth in economic and agricultural activities, water demand has increased significantly. Also, considering the severe water scarcity and imbalance between supply and demand, water resource management has become very complex and crucial. Various models, such as the WEAP model, have been developed to simulate integrated water resource management and evaluate how to allocate limited water resources among different consumers. The aim of this research is to examine the status of water resources in the Mahabad Dam Basin and the impact of increased demand scenarios on meeting the needs.

Material and Methods

The Mahabad Dam Basin is located in the northwest of Iran, in West Azerbaijan Province, covering an area of 1384 square kilometers. This basin extends between the geographical coordinates of 45°25'59" and 45°53'59" East longitude and 36°22'59" and 36°59'59" North latitude. The study area includes two sub-basins, Koter and Beitass (upstream of Mahabad Dam), and the Mahabad Plain (downstream of Mahabad Dam). The Koter sub-basin, with an area of 467 square kilometers, is located in the western part of the study area. The Beitass sub-basin, with an area of 285.87 square kilometers, is located in the eastern part of the basin. In this study, weather data, including daily precipitation and minimum and maximum daily temperatures, hydrological data, including daily flows, and physiographic characteristics of the basin were collected to form the WEAP model. The reservoir storage volume and levels of the Mahabad reservoir from 1992 to 2011 and 2012 to 2021 were used for calibration and validation. Subsequently, scenarios were designed and implemented, and the results were evaluated. The scenarios used are increasing agricultural land area by 10%, 20%, and 30%, and population growth.

Results and Discussion

The results indicate that the Mahabad Dam will face a deficit of 8.18 million cubic meters according to scenarios S1, S2, S3, and S4, with shortages of 30, 41, 52^{**},^{**} and 21 million cubic meters, respectively. Notably, the deficits highlight significant challenges in meeting the projected water demand. The highest water demand over the 17-year

horizon is for agricultural use, underscoring the critical role that agricultural activities play in the region's economy and food security. This heavy reliance on water for agriculture necessitates careful planning and resource management to prevent agricultural losses and ensure sustainability. Among the operational scenarios analyzed, the reference scenario was chosen as the preferred scenario due to having the highest water supply percentage and reliability index. This choice indicates a strategic prioritization of water resources to maximize efficiency and support agricultural needs**,** while also promoting long-term sustainability. The implications of adopting the reference scenario could lead to a more resilient water management framework, allowing stakeholders to navigate challenges more effectively in the face of varying demand and supply conditions.

Conclusion

In the current study, water resources were simulated using the WEAP model, analyzing various scenarios to compare water allocation during the base period and projections of population growth and increased cultivated areas. The results indicate that during the summer, when agricultural water demand peaks, not all needs can be met, leading to unmet demand that could increase from 18 million cubic meters per year to 52 million with expanded cultivation. As urban demand is prioritized, the water allocated to agriculture, the environment**,** and industry will inevitably decrease unless urban needs are fully satisfied. While potable water supply for Mahabad is likely to remain adequate, agricultural demands have the lowest reliability among all needs assessed. The reliability index shows that increasing cultivated areas will result in a 9% decrease compared to the base period, highlighting the urgent need for effective water management (Hellmann et al., 2010). Continued population growth and rising cultivation levels make achieving a balance in water supply and demand in the Mahabad Dam watershed unlikely.



بررسی تاثیر افزایش سطح زیرکشت و رشد جمعیت بر منابع آب سطحی حوضه آبخیز سد مهاباد با استفاده از مدل WEAP

نظام الدین محمودی^۱، هیراد عبقری^{۲*}

^۱دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۲دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله	امروزه به دلیل رشد جمعیت، ارتقای سطح بهداشت و رفاه عمومی، گسترش صنعت و رشد فعالیت‌های اقتصادی و کشاورزی، سرانه مصرف آب به شدت افزایش یافته است. همچنین با توجه به کمبود شدید آب و عدم توازن بین عرضه و تقاضا، مدیریت منابع آب بسیار پیچیده و با اهمیت شده است. در همین راستا مدل‌های مختلفی از جمله مدل WEAP به منظور شبیه‌سازی مدیریت یکپارچه منابع آب و ارزیابی چگونگی تخصیص منابع آبی محدود میان مصرف کنندگان مختلف توسعه یافته‌اند. هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی وضعیت منابع آبی حوضه آبخیز سد مهاباد و تاثیر سناریوهای افزایش تقاضا بر نحوه تامین نیازها می‌باشد. در این تحقیق پس از جمع‌آوری اطلاعات هواشناسی از جمله بارش‌های روزانه و دمای حداقل و حداکثر روزانه، اطلاعات هیدرولوژیکی از جمله دبی‌های روزانه و مشخصات فیزیوگرافی حوضه فایل ورودی مدل WEAP تشکیل داده شد. داده‌های مقادیر حجم و تراز مشاهداتی سد مخزنی مهاباد در بازه زمانی ۱۳۷۱ تا ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ به ترتیب برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. در ادامه سناریوهای بهره‌برداری از مخزن سد تدوین و اجرا شده و نتایج بدست آمده مورد ارزیابی قرار گرفت. سناریوهای مورد استفاده شامل سناریوی افزایش سطح زیرکشت ۲۰،۱۰ و ۳۰ درصدی نسبت وضعیت کنونی و سناریوی افزایش جمعیت می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد که سد مهاباد طبق سناریو مرجع با کمبود ۱۸/۸ میلیون مترمکعب و براساس سناریوهای S1، S2، S3 و S4 به ترتیب با کمبود ۳۰، ۴۱، ۵۲ و ۲۱ میلیون متر مکعب روبه رو خواهد شد. بیشترین نیاز تأمین آب در افق ۱۷ ساله مربوط به کاربری کشاورزی می‌باشد. از میان سناریوهای اجرایی، سناریو مرجع به دلیل اینکه دارای بیشترین درصد تأمین آب بوده و شاخص اطمینان پذیری بالایی دارد، به عنوان سناریو برگزیده انتخاب گردید.
کلمات کلیدی:	
سناریوی رشد جمعیت	
مدل WEAP	
مدیریت منابع آب	
حوضه سد مهاباد	
گسترش اراضی کشاورزی	

مقدمه

امروزه به دلیل رشد جمعیت، ارتقای سطح بهداشت و رفاه عمومی، گسترش صنعت و رشد فعالیت‌های اقتصادی و کشاورزی، سرانه مصرف آب به شدت افزایش یافته و با توجه به کمبود شدید آب و عدم توازن بین عرضه و تقاضا، مدیریت منابع آب بسیار پیچیده و با اهمیت شده است. تأثیر توسعه بالادست حوضه بر مصارف و تقاضای پایین دست، یکی از زمینه‌های مطرح در مدیریت منابع آب است. در دو دهه اخیر در سراسر جهان سعی گردیده است که استفاده از منابع آبی محدود و تخصیص آن به مصرف‌کنندگان، با نگرشی یکپارچه انجام شود. در همین راستا مدل‌های مختلفی به منظور شبیه‌سازی مدیریت یکپارچه منابع آب و ارزیابی چگونگی تخصیص منابع آبی محدود میان مصرف‌کنندگان مختلف توسعه یافته‌اند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به MODSIM¹، RIBASIM²، MIKEBASIN³ و WEAP³ اشاره کرد (Ilich, 2024).

مدل RIBASIM نه تنها شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیک بلکه جزئیات تخصیص آب از سایر مدل‌ها قویتر است اما تدوین و آماده‌سازی آن مستلزم صرف هزینه‌های زیادی است. در مدل MODSIM ممکن است تمام کمبودها به یک نقطه مصرف تحمیل شوند درحالی که در WEAP، کمبودها به طور مساوی بین نقاط نیاز با اولویت یکسان تقسیم می‌شوند. مدل MIKE BASIN به نقاط نیاز بالاتر آب بیشتری تخصیص می‌دهد در صورتیکه WEAP در این خصوص عادلانه‌تر عمل می‌کند. در مدل MIKE BASIN امکان انتقال کمبود به دوره زمانی بعدی وجود دارد، درحالیکه در MODSIM این امکان در نظر گرفته نشده است. در مدل MIKE BASIN زیر برنامه‌های آب زیرزمینی و کیفیت، مربوط به خود مدل است درحالیکه WEAP برای این منظور از نرم افزارهای دیگر کمک می‌گیرد. از میان مدل‌های یادشده، تنها مدل WEAP است که اثر تغییر میزان آب اختصاص یافته به مصرف‌کنندگان مختلف را بر منافع اقتصادی حاصل از مصرف آب ارزیابی می‌کند که این مزیت به ویژه هنگامی حائز اهمیت است که اثرات طولانی مدت تغییر تخصیص در منابع آب ارزیابی شود. در مجموع با توجه به مقایسه انجام شده، نحوه پشتیبانی و مدنظر قرار دادن هزینه‌ها، مدل WEAP برای شرایط کنونی کشور مناسب‌تر است (Bagheri & Morid, 2013).

WEAP براساس معادلات پایه بیلان آبی عمل کرده و آن را می‌توان در سیستم‌های شهری و کشاورزی، حوضه‌های مستقل یا سیستم‌های رودخانه‌ای مرزی پیچیده به کار برد. ساختار داده‌ها و سطح جزئیات را می‌توان به سادگی به شکل دلخواه درآورد تا نیازهای یک تحلیل خاص را برآورده کرد و محدودیت‌های ناشی از کمبود داده‌ها را نشان داد (Pourmohammadi, Fatemi, Rasaie, Hashemi Monfared & Khosravi, 2021). مطالعات متعددی با استفاده از WEAP در سراسر جهان انجام شده است که به عنوان نمونه می‌توان به زیر اشاره کرد:

1 Modeling and simulation

2 River Basin Simulation

3 Water Evaluation and Planning System

ابریشم چی و همکاران (Abrishamchi, Alizadeh, Tajrishy & Abrishamchi, 2007) با استفاده از مدل WEAP سناریوهای مدیریت منابع آب حوضه آبخیز رودخانه کرخه را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج بررسی ایشان، قابلیت مدل WEAP را در تجزیه و تحلیل سناریوهای مدیریت منابع آب در مقیاس حوضه رودخانه نشان داد. اینگول بلانکو و مک کیلی (Ingol-Blanco & McKinney, 2009)، با استفاده از WEAP مدل هیدرولوژیکی حوضه ریوکنکاس را که در کشور مکزیک در شیپاهو واقع شده است، شبیه‌سازی کردند. با در نظر گرفتن نمودارهای شبیه‌سازی جریان با داده‌های چند ایستگاه مختلف ضریب رگرسیون بدست آمده برابر $R=0.95$ می‌باشد که نشانگر ضریب همبستگی و عملکرد بالای مدل است. بنابراین نتایج بدست آمده بیان‌کننده مطابقت خوب بین مشاهدات واقعی و مدل شبیه‌سازی شده جریان می‌باشد.

رمضان و همکاران (Ramadan, Shalash, Fahmy & Abdel-Aal, 2019)، در ایالت شاریکا در شرق رود نیل با استفاده از مدل WEAP به مدل‌سازی عددی حوضه پرداختند. آنان برای تعیین میزان تقاضا و کمبود آب در آینده چندین سناریو را تعریف کردند. نتایج نشان داد که استفاده مجدد از آب‌های زهکشی شده حساس‌ترین پارامتر در مدل است. یعقوبی و همکاران (Yaghoobi, Shabanlou & Yosefvand, 2014)، در مطالعه‌ای حوضه آبخیز قره‌سو برای شبیه‌سازی بارش-رواناب از مدل WEAP استفاده کرده‌اند. محاسبات به دست آمده از مدل نشان داد که سطح مشارکت زیرحوضه کوچک و بزرگ در خروجی حوضه سیلابی به مقدار رواناب زیرحوضه بستگی ندارد و زیرحوضه با رواناب بیشتر لزوماً سهم بیشتری در رواناب خروجی ندارد. به عبارت دیگر، زیرحوضه‌ها یک نوع از رفتار غیرخطی نشان دادند.

شرافتی و سبحانی سنجبد (Sharafati & Sabhani Sanjbad, 2019)، با استفاده از مدل WEAP به بهینه‌سازی تخصیص آب مخزن سد یامچی پرداختند. آنان با استفاده از داده‌های ده ساله موجود ۱۳۸۷-۱۳۹۷ نیازهای آبی و آورد ماهیانه آبی سد را مدل‌سازی کردند. نتایج نشان داد که اولویت اول منطقه آب شرب می‌باشد همچنین دریافتند که در صورت تخصیص کامل نیاز شرب و محیط زیست در بهترین حالت تنها ۵۵ درصد نیاز کشاورزی قابل تأمین می‌باشد.

مردانیان و همکاران (Mardanian, Zare Bidaki & Abdollahi, 2020)، در تحقیقی تخصیص بهینه منابع آب حوضه خانمیرزا را با استفاده از مدل WEAP مورد مطالعه قرار دادند. برای این منظور چهار سناریوی محتمل سناریوی مرجع، سناریوی بدبینانه، سناریوی خوش‌بینانه و سناریوی واقع‌گرایانه در ده سال آینده را در مدل مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد به ترتیب در سناریوی مرجع، سناریوی بدبینانه، سناریوی خوش‌بینانه و سناریوی واقع‌گرایانه ۵۱، ۷۹، ۳۰ و ۴۱ میلیون مترمکعب از حجم تقاضا قابل تحویل نیست.

رحیمی و حافظ پرست (Rahimi & Hafez Parast Moddat, 2022)، با استفاده از مدل WEAP پیش‌بینی رواناب با مدل SVR در سناریوهای اقلیمی و برآورد تقاضاهای آبی ناشی از تغییرات آن را بررسی کردند. در این پژوهش پارامترهای ماهانه دما و بارش سد جامیشان با استفاده از روش عامل تغییر ریزمقیاس و برای دوره آتی تولید شدند. از روش یادگیری ماشینی رگرسیون بردار پشتیبان تصحیح شده با تغییر در پارامترهای موثر برای پیش‌بینی رواناب در دوره تغییر اقلیم استفاده گردید. نتایج مدل اقلیمی به طور میانگین افزایش

دمای ۰/۵ تا ۱/۵ درجه سلسیوس را در طول دوره آماری نشان می‌دهد. نتایج بارش شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که میانگین بارش ماهیانه با سناریوی RCP8.5 در دوره‌ی آتی در مدل HADGEM2_ES با افزایش ۵٪ و در مدل MIROC5 با کاهش ۶٪ نسبت به دوره‌ی پایه همراه بوده است. بررسی نتایج پیش‌بینی دبی با استفاده از مدل SVR حاکی از آن است که رواناب نسبت به دوره‌ی پایه با کاهش همراه است. به منظور برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب با استفاده از نرم افزار WEAP به شبیه‌سازی سد جامیشان پرداخته شد. بدین منظور با در نظر گرفتن سه الگوی کشت متفاوت مقادیر تأمین و کمبود برای هر نیاز برآورد گردید. شبیه‌سازی الگوی کشت‌های مختلف در WEAP نشان می‌دهد به طور میانگین تأمین برابر با ۷۵٪ است.

لیانی و بخشوده (Layani & Bakhshoodeh, 2022) به منظور ارزیابی اثرات تغییرات شرایط آب و هوایی حوضه آبخیز رودخانه خیرآباد از مدل شبیه‌سازی WEAP استفاده کردند. نتایج نشان داد که شاخص بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی آب محاسبه شده در شرایط اقلیمی میانه برای محصولات جو، گوجه و خیار بیشترین اثرپذیری را از تغییر شرایط آب و هوایی داشته است.

دشتی و همکاران (Dashti, Sani, Hosseinzadeh & Majnoni, 2022)، با استفاده از مدل WEAP به ارزیابی شاخص‌های پایداری کشاورزی تحت سناریوهای اقلیمی و مدیریت منابع آب در حوضه آبخیز آجی چای پرداختند. از میان سناریوهای مدیریتی، افزایش راندمان آب آبیاری بیشتر از سایر سناریوها تقاضای برآورد نشده را کاهش داده و در نتیجه باعث کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم بر پایداری منابع آب می‌گردد.

اکبری و همکاران (Akbari, Shamsi, Khani Tamliel & Mirabbasi Najafabadi, 2023)، در تحقیقی به ارزیابی بهره‌برداری از سدها تحت برنامه‌های مختلف مدیریتی با استفاده از مدل WEAP پرداختند. با توجه به نتایج به دست آمده برای سناریوی مرجع، این سد به تنهایی پاسخگوی تمام نیازهای تعریف شده به طور کامل در افق طرح نمی‌باشد، مگر با اعمال اقداماتی مدیریتی در قالب سناریوها، که باعث کاهش مصرف آب در بخش‌های مختلف تقاضا شود.

حکمی کرمانی و همکاران (Hakami-Kermani, Babazadeh, Porhemmat & Sarai-Tabrizi, 2020)، در پژوهشی به ارزیابی شاخص‌های عملکرد سیستم مخزن سد نمود در سناریوهای تغییر اقلیم پرداختند. جهت نیل به این هدف به ریز مقیاس نمایی داده‌های EC-EARTH-GCM با استفاده از مدل LARS-WG6 پرداختند. جهت بررسی و تخصیص منابع آب از مدل WEAP استفاده کردند. نتایج نشان داد که بر اساس سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۸/۳۶٪ و ۱۲/۶۴٪ کاهش در عملکرد شاخص‌های مخزن می‌شود. همچنین با کاهش ۳۰ درصدی تقاضای آب برای کشاورزی در سناریوی RCP4.5 دارای بیشترین تاثیر در شاخص پایداری مخزن می‌باشد.

سان و همکاران (Sun, Yan, Bao & Wang, 2022)، به بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر مقدار رواناب در حوضه آبخیز کینه‌وای^۱ چین با استفاده از مدل SWAT پرداختند. نتایج نشان داد که مدل کالیبره شده SWAT می‌تواند مقدار رواناب را در مقیاس روزانه و ماهانه پیش‌بینی نماید. نسبت به دوره پایه میانگین بارش

سالانه در آینده تحت تاثیر سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۵/۶۴٪، ۲/۶۰٪ و ۶۸/۶۸٪ افزایش پیدا خواهد کرد. در نتیجه مقدار میانگین رواناب سالانه نیز به ترتیب ۱۶/۲۴٪، ۸/۸۴٪ و ۱۷/۹۶٪ افزایش خواهد یافت. همچنین افزایش رواناب مقدار آب کافی برای توسعه اقتصادی و اجتماعی را در منطقه فراهم خواهد کرد.

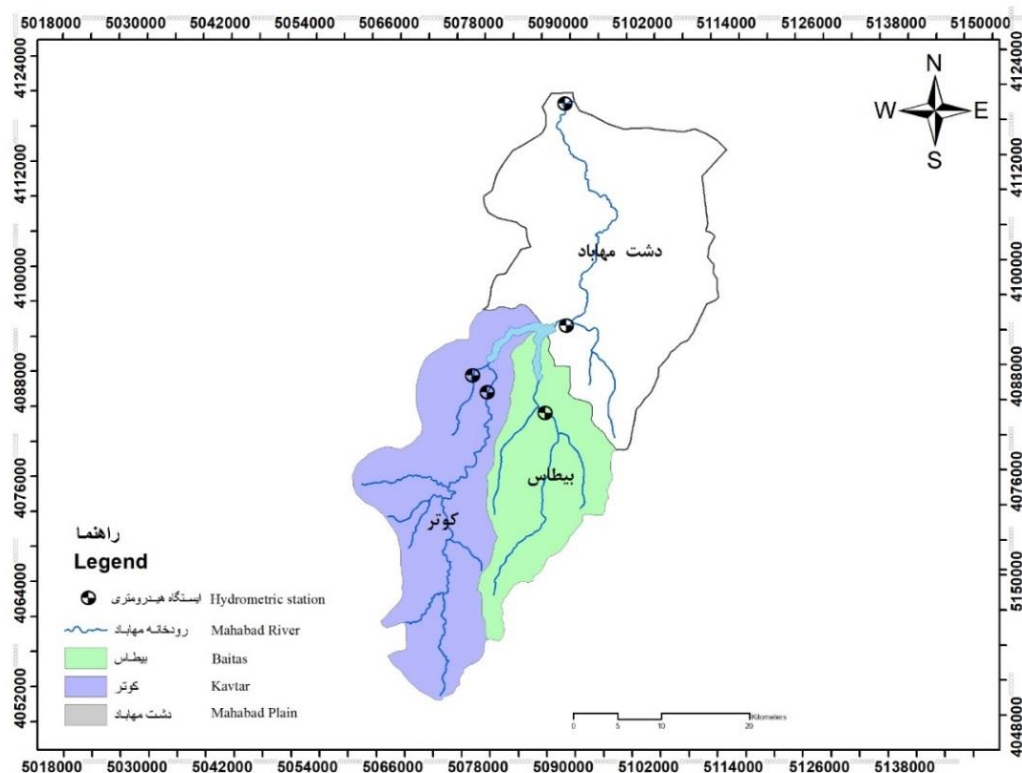
کاهش آبدهی رودخانه کوتر و بیطاس به عنوان اصلی ترین منبع تأمین آب سد مهاباد، برداشتهای غیر مجاز از آبهای سطحی، رقابت بر سر آب بین بخشهای مختلف و تأثیر آن بر سیستم آبی حوضه، ضرورت برنامه ریزی در مدیریت منابع آب این منطقه را نشان می دهد. این در حالی است که در دسترس نبودن داده های کافی از آبدهی در سراسر حوضه، مدیریت منابع آب سطحی را با مشکل مواجه کرده است.

هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی وضعیت منابع آبی حوضه آبخیز سد مهاباد و تاثیر سناریوهای افزایش تقاضا بر نحوه تامین نیازها می باشد. بر این اساس وضعیت منابع آب دشت مهاباد در دو بخش کشاورزی و شرب با استفاده از مدل WEAP تحت ۵ سناریو مرجع و افزایش جمعیت و سطح زیر کشت (S1، S2 و S3) مورد بررسی و مقایسه قرار خواهد گرفت که هدف از آن رسیدن به جواب این سوال است که آیا سد مهاباد توانایی تامین نیازهای آبی شرب شهر مهاباد و حقابه های قانونی پایین دست را دارد یا خیر.

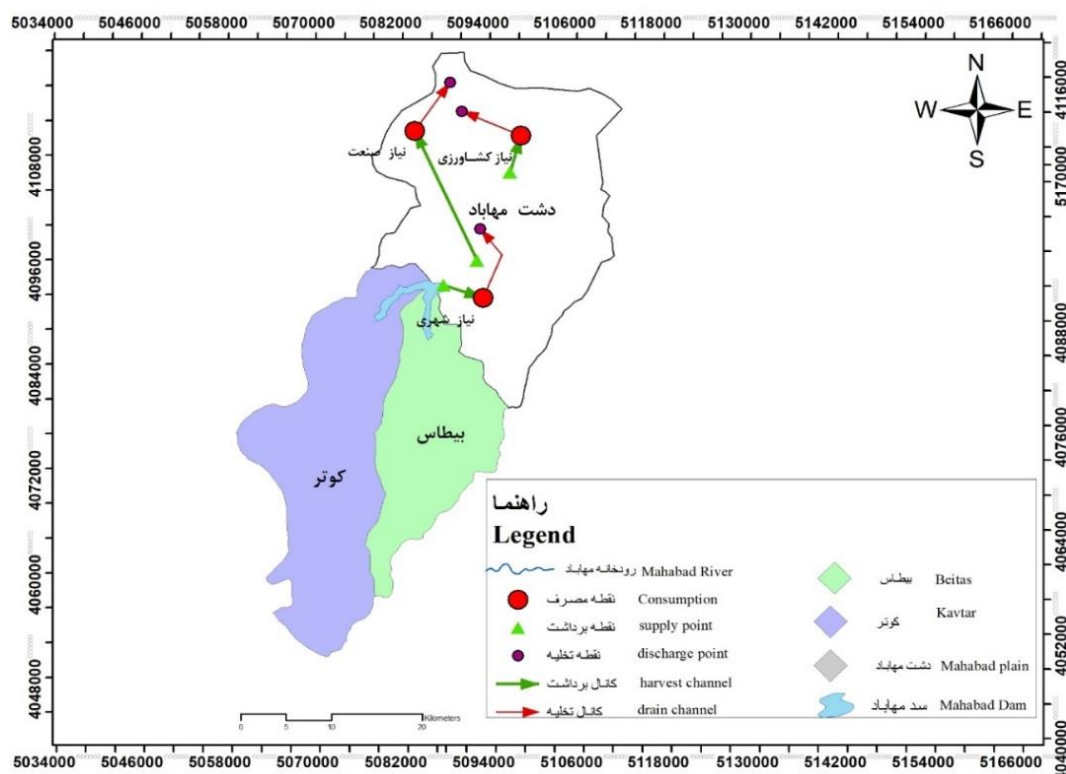
مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز سد مهاباد در شمال غربی کشور ایران و در استان آذربایجان غربی با مساحت ۱۳۸۴ کیلومترمربع واقع شده است. این حوضه بین مختصات جغرافیایی ۴۵° ۲۵' ۵۹" و ۴۵° ۵۳' ۵۹" طول شرقی و ۳۶° ۲۲' ۵۹" و ۳۶° ۵۹' ۵۹" عرض شمالی گسترش یافته است. از لحاظ ارتفاعی بین ارتفاع ۱۲۸۰ متر در خروجی حوضه تا ارتفاع ۲۶۳۹ متر قرار گرفته است. این حوضه از شمال به دریاچه ارومیه، از شرق به حوضه آبخیز سیمینه رود، از غرب به حوضه آبخیز گادر و از جنوب به حوضه آبخیز زاب (شهرستان پیرانشهر) محدود است (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه شامل دو زیر حوضه کوتر و بیطاس (بالادست سد مهاباد) و دشت مهاباد (پایین دست سد مهاباد) است. زیرحوضه کوتر با مساحت ۴۶۷ کیلومترمربع در بخش غربی منطقه مورد مطالعه واقع شده است. زیرحوضه بیطاس، با ۲۸۵/۸۷ کیلومترمربع مساحت در بخش شرقی حوضه واقع است متوسط بارش سالیانه منطقه پژوهش بر اساس روش خطوط همباران ۵۴۲/۵۸ میلیمتر می باشد. فصول زمستان و بهار فصول بارندگی منطقه محسوب می شوند و بیشترین شدت بارندگی در بهار مشاهده می شود. فصل پائیز از نظر میزان بارندگی پس از بهار و زمستان در مرتبه سوم قرار دارد. حوضه آبخیز مهاباد دارای ۵ ایستگاه هیدرومتری بیطاس، کوتر، دهبکر، پل سرخ و گردیعقوب است. دو ایستگاه دهبکر و پل سرخ از سال آبی ۵۷ به بعد حذف شده و فاقد آمار می باشند مطالعات هواشناسی حوضه آبخیز سد مهاباد، شرکت مهندسی مشاور پنگان آوران (Penghan Avaran Consulting Engineers, 2019). در شکل (۱) و (۲) موقعیت جغرافیایی و شماتیک حوضه آبخیز مهاباد ارائه شده است.



شکل ۱- منطقه مطالعاتی حوضه آبخیز سد مه‌باد
Fig.1. Study area of the Mahabad Dam Basin



شکل ۲- شماتیک مدل توسعه داده شده در نرم افزار WEAP

Fig.2. Schematic of the developed model in WEAP

روش تحقیق

مدیریت تخصیص منابع آب حوزه آبخیز سد مه‌باد با مدل WEAP انجام پذیرفته است. به منظور انجام بررسی‌ها و مدل‌سازی‌های مرتبط با بخش ارزیابی و مدیریت منابع آب، اطلاعات اقلیمی (بارش و دما)، جمعیت شناسی (مقدار جمعیت شهری و روستایی) و فیزیوگرافی منطقه از سازمان‌های مربوطه جمع‌آوری گردید (جدول ۱). در ادامه مرز حوزه‌های رودخانه محدوده مطالعاتی، محل قرارگیری مخزن سد، محل قرارگیری نقاط تقاضا (مصرف)، مقادیر نیاز آبی در بخش‌های شرب و خانگی، نیاز خالص آب مورد نیاز در اراضی کشاورزی، باغداری و محیط‌زیست و صنایع تحت شرب سد مه‌باد مشخص شدند. داده‌های اقلیمی شامل بارش، دمای حداقل و حداکثر، تبخیر و تعرق مرجع، تبخیر از سطح آب می باشند. تمام نقاط مصرف و منابع آبی موجود از جمله نقاط برداشت آب کشاورزی، شرب و صنعت از رودخانه مه‌باد، کانال یا لوله‌های انتقال و همچنین محل تخلیه فاضلاب شهری و پساب صنعتی و کشاورزی در محیط نرم‌افزار Arc Map تهیه شد. سپس این نقشه‌ها در محیط WEAP فراخوانی و شماتیک مدل پیکربندی گردید.

جدول ۱- داده ها و منبع اخذ اطلاعات

Table 1- Data and sources of information

ردیف Row	نوع داده Data Type	منبع اخذ اطلاعات و داده ها Source of Information and Data
1	داده های اقلیمی Climatic Data	سازمان هواشناسی کل کشور National Meteorological Organization
2	داده های هیدرومتری Hydrometric Data	شرکت آب منطقه ای استان آذربایجان غربی West Azerbaijan Regional Water Company
3	اطلاعات جمعیت شناسی Demographic Information	مرکز آمار و جمعیت کل کشور National Statistics and Population Center
4	اطلاعات مخازن Reservoir Information	شرکت آب منطقه ای استان آذربایجان غربی West Azerbaijan Regional Water Company
5	اطلاعات کشاورزی Agricultural Information	اداره کل جهاد کشاورزی استان آذربایجان غربی West Azerbaijan Department of Agriculture
6	اطلاعات نیاز آبی بخش های مختلف تقاضا Water Demand Information for Various Sectors	شرکت بهره برداری واحد مهاباد Vahdat Mahabad Operation Company

پس از پیکربندی مدل طول دوره شبیه سازی، گام زمانی، سال پایه و واحد پارامترها به مدل معرفی شدند. سال ۲۰۲۳ به دلیل وجود اطلاعات کافی و مناسب به عنوان سال پایه (سناریوی مرجع) انتخاب و طول دوره شبیه سازی از سال ۲۰۲۳ تا سال ۲۰۴۰ با گام های زمانی ماهیانه در نظر گرفته شد. مدل WEAP دارای گام های زمانی ماهانه و سالانه می باشد که در صورت وجود داده و اطلاعات، گام زمانی ماهانه از دقت بیشتری برخوردار است.

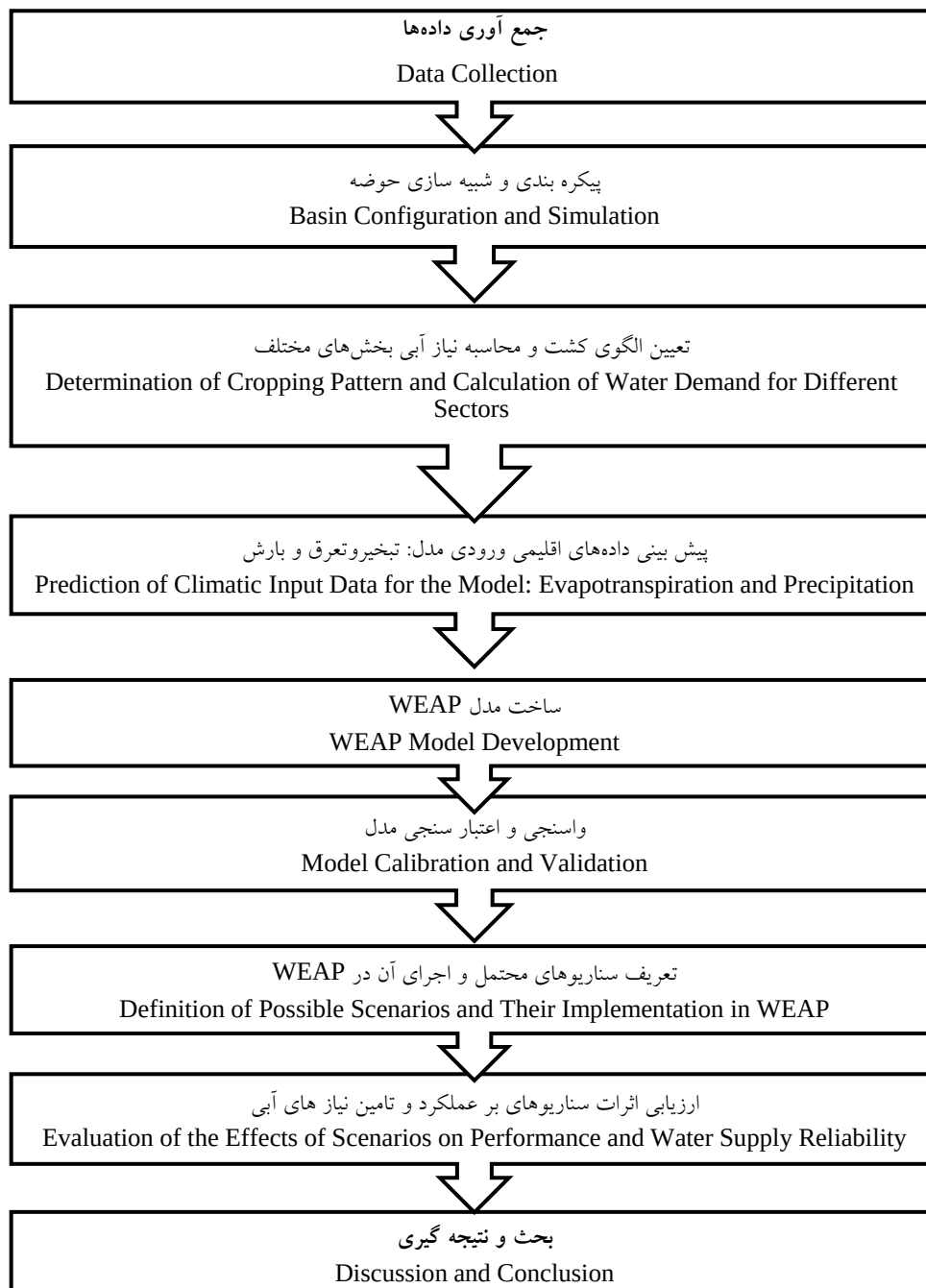
در WEAP تقاضا آبی یک گره نیاز (SD)، به صورت مجموع تقاضاهای شاخه های پایه آن (Br) تعریف می شود. شاخه پایه، شاخه ای است که زیر آن شاخه ای وجود ندارد.

$$ADDS = \sum (TALBr \times WURBr) \quad (1)$$

در رابطه (۱) AD، تقاضای سالانه، TAL تراز فعالیت کل و WUR نرخ استفاده آب است. تراز فعالیت کل از رابطه (۲) حاصل می شود، که در آن Br' شاخه بالای شاخه پایه Br، Br'' شاخه بالای Br' و ... می باشند. AL معرف تراز فعالیت است (Lee, Sieber & Swartz, 2005).

$$TALBr = ALBr \times ALBr' \times ALBr'' \times \dots \quad (2)$$

گام های انجام این مطالعه از منظر روش شناسی شامل موارد زیر هستند که در شکل (۳) فرآیند کلی انجام تحقیق ارائه شده است.



شکل ۳- نمودار جریان‌ی روش تحقیق

Fig. 3. Flowchart of the research methodology

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

در پژوهش حاضر در بازه زمانی ۱۳۷۱ تا ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ به ترتیب برای واسنجی و اعتبارسنجی مدنظر قرار گرفتند. در این راستا از مقادیر حجم و تراز مشاهداتی سد مخزنی مهاباد استفاده شد (جدول ۲). به منظور کاهش حداکثری خطاها و درنهایت دستیابی به نتایج قابل اطمینان، اقدام به واسنجی متغیرهای ورودی مدل با استفاده از روش رگرسیون گیری غیرخطی (الگوریتم گاوس - مارکوارت - لونبرگ) در ابزار PEST¹ درمدل WEAP شد (Doherty & Hunt, 2010). پس از واسنجی، بدون تغییر در متغیرهای ثابت و پارامترهای واسنجی شده، نتایج مدل برای دوره ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ شبیه‌سازی و اعتبارسنجی شد. هدف از این مورد تعیین کارایی مدل برای پیش‌بینی سال‌های آتی می‌باشد. برای ارزیابی کمی نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل از شاخص‌های مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE²) و ضریب نش- ساتکلیف (NSE³) استفاده شد. فرمول‌های استفاده شده برای این پارامترها به شرح زیر و نتایج آن در جدول (۳) ارائه شده است.

$$RMSE^4 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Y_m - Y_p)^2} \quad (3)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{max} - X_{min}} \quad (4)$$

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Y_m - Y_p)^2}{\sum_{t=1}^n (Y_m - \bar{Y}_p)^2} \quad (5)$$

که در روابط بالا Y_m مقدار مشاهداتی، $\bar{Y}_m$ متوسط مقادیر مشاهداتی، Y_p مقدار پیش‌بینی شده، $\bar{Y}_p$ متوسط مقادیر پیش‌بینی شده، X_{max} و X_{min} به ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر مشاهداتی است. در شبیه‌سازی پارامترها هر چقدر مقدار NASH به یک و NRMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، نتایج به دست آمده از مدل دارای اطمینان بیشتری است (Rahimi & Hafez Parast Moddat, 2022).

1 Parameter Estimation tool

2 Normalized Root Mean Squared Error

3 Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient

4 Root Mean Squared Error

جدول ۲- مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده حجم مخزن سد مهاباد

(شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی)

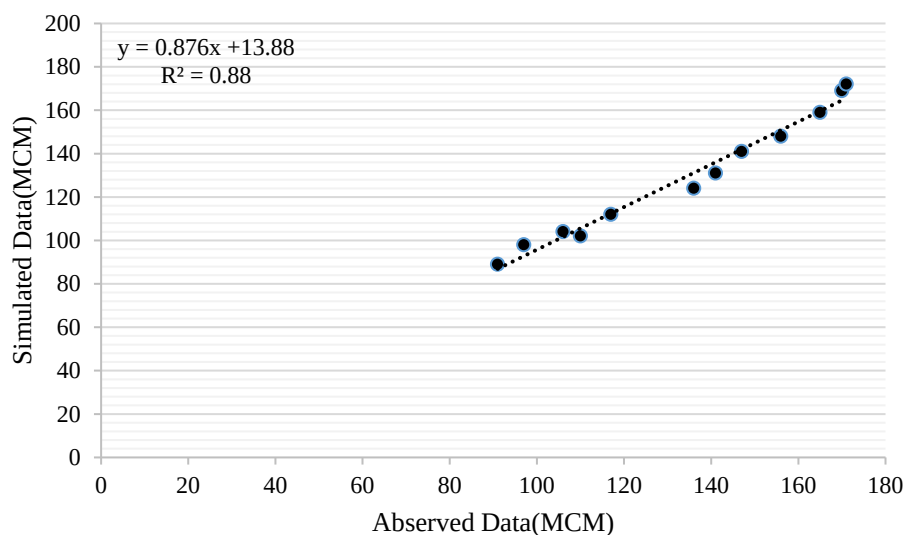
**Table 2- Observed and simulated reservoir volume of the Mahabad Dam
(West Azerbaijan Regional Water Company)**

حجم مخزن (MCM)	ماه‌های سال											
Reservoir Volume(MCM)	Months of the Year											
	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
مقادیر مشاهداتی Observed Values	91	106	141	156	165	170	171	147	136	117	110	97
مقادیر شبیه سازی شده Simulated Values	89	104	131	148	159	169	172	141	124	112	102	98

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های مورد استفاده در ارزیابی دقت مدل

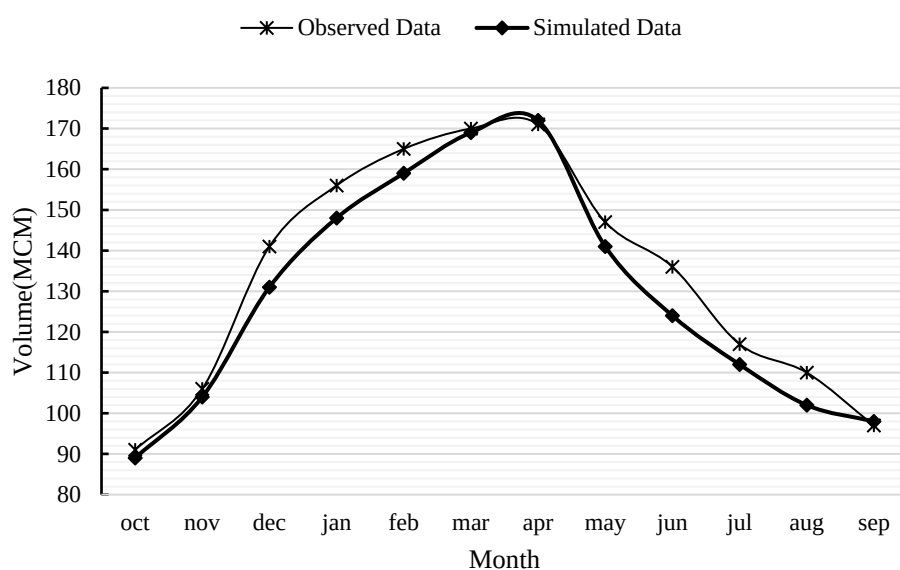
Table 3- Values of indices used for model accuracy evaluation

Index	Value	
	Calibration	Validation
NRMSE	0.08	0.11
NASH	0.94	0.85



شکل ۴- نمودار اسکاتر حجم مخزن شبیه‌سازی و مشاهده‌ای سد مهاباد

Fig.4. Scatter plot of simulated and observed volume of Mahabad Dam's reservoir



شکل ۵- مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی حجم مخزن سد مه‌آباد بر حسب میلیون مترمکعب
Fig. 5. Comparison between observed and simulated reservoir of Mahabad Dam's volume (in million cubic meters)

سناریوها

۱- سناریوی مرجع (Reference scenario): بررسی تغییرات عرضه و تقاضا در سطح حوضه آبخیز در آینده با کمک سناریوی مرجع صورت می‌گیرد. این سناریو یک سناریوی پایه است که شرایط حال را بر مبنای منابع و مصارف فعلی مدل می‌کند و در آن از داده‌های واقعی استفاده می‌شود تا بتوان به این وسیله بهترین تخمین از دوره مورد مطالعه را انجام داد.

۲- تغییر سطح زیر کشت (S1، S2 و S3): در این سناریو فرض بر این است که در سال‌های آینده، سطح زیر کشت به ترتیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد افزایش پیدا خواهد کرد. در جدول (۴) درصد الگوی کشت پایاب سد مه‌آباد آورده شده است.

جدول ۴- الگوی کشت پایاب سد مه‌آباد در مدل WEAP

Table 4 - Downstream Cropping Pattern of Mahabad Dam in the WEAP Model
 (Vahdat Mahabad Operation Company, 2019)

Crop Type	Wheat	Barley	Sugar Beet	Alfalfa	Apple Orchard	Nursery	Others
Cultivated Area (%)	12	7	5	15	38	10	13

۳- سناریو افزایش جمعیت (S4): طبق آخرین گزارش مرکز آمار ایران، نرخ رشد جمعیت در مهاباد ۱/۱۷ اعلام شده است. در این سناریو فرض بر این است که تمامی شرایط ثابت بوده و میزان نرخ رشد جمعیت از ۱/۱۷ درصد به ۵ درصد افزایش پیدا خواهد کرد.

مبنای شاخص اطمینان پذیری (RE)

سناریوها بر مبنای شاخص اطمینان پذیری (RE) مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرند. این پارامتر کل ماه‌هایی که سیستم در تامین آب با موفقیت روبه رو بوده نسبت به تعداد کل ماه‌های دوره بهره‌برداری آن است که از طریق رابطه (۶) محاسبه می‌گردد.

$$Re = (\sum_{j=1}^M dj) / T \quad (6)$$

بطوریکه:

Re: شاخص اطمینان پذیری

M: کل زمانهایی که سیستم در تامین آب موفق عمل کرده است

dj: z امین پیروزی سیستم

T: کل زمان شبیه سازی

آستانه شکست سیستم برای نقاط نیاز کشاورزی ۶۰٪ و برای نیازهای شرب ۹۰٪ در نظر گرفته می‌شود (Feizi & Aghajani Jomayran, 2021).

نتایج و بحث

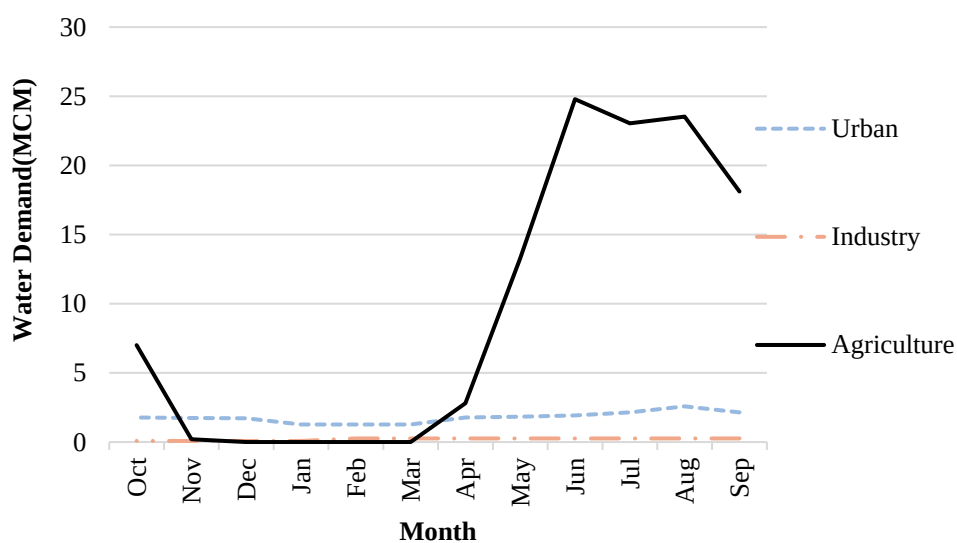
سناریوی مرجع

با توجه به نتایج مدل WEAP در سناریوی مرجع مشاهده می‌شود که بیشترین میزان نیاز در ماه‌های خرداد و کمترین میزان نیاز در ماه‌های دی و بهمن می‌باشد. نیاز شرب و صنعت در بیشتر ماه‌های سال به طور کامل تأمین می‌شود که این امر با توجه به اینکه تأمین آب در گرهای تقاضای شرب و صنعت در اولویت اول قرار دارد دور از انتظار نبوده است (جدول ۵). در شکل (۶) نمودار مقادیر حجم آب مورد نیاز برای مصارف شرب، صنعت و کشاورزی نشان داده شده است. در شکل (۷) نیز درصد تامین نیاز برای مصارف ذکر شده آورده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۴) و شکل (۶) و (۷) بیشترین آب تأمین نشده در بخش کشاورزی است که نشان دهنده اهمیت مدیریت تقاضای آب در این بخش است. با توجه به الگوی کشت منطقه، بیشتر اراضی کشاورزی به کشت محصولاتی با نیاز آبی زیاد به ویژه در ماه‌های گرم سال اختصاص دارند. بنابراین، کمبود آب در این ماه‌ها شدیدتر بوده و بخش زیادی از نیازها تأمین نمی‌شوند. در اراضی کشاورزی مجموع نیاز آبی سالانه ۲۰۰ میلیون مترمکعب است که از این مقادیر، ۶۸٪ تأمین می‌شود.

جدول ۵- میزان تقاضا و درصد تأمین نیاز در گره های تقاضا (سناریوی مرجع)

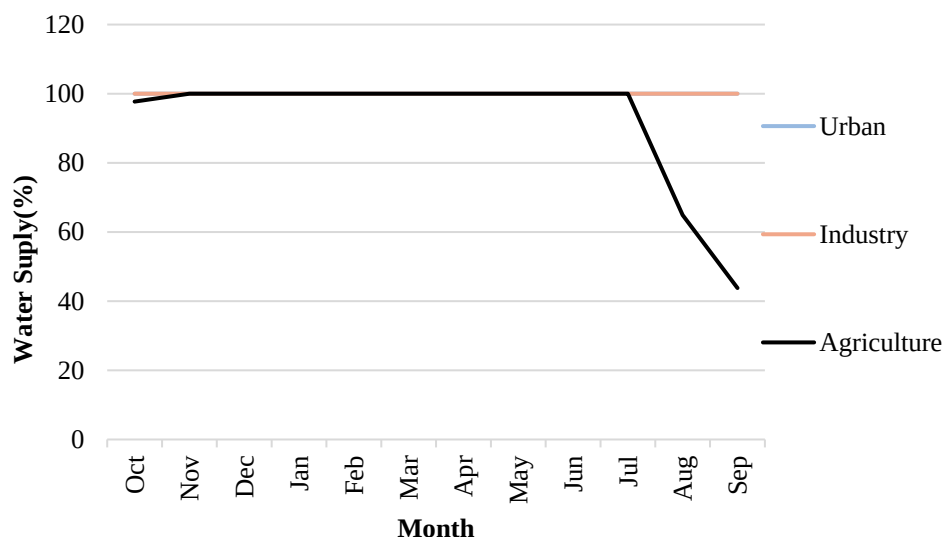
Table 5- Demand and supply percentage at demand nodes (Reference Scenario)

Demand Point		Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Domestic	Demand (MCM)	1.78	1.74	1.72	1.27	1.27	1.27	1.78	1.83	1.93	2.15	2.58	2.15
	Coverage (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Industry	Demand (MCM)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
	Coverage (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Agriculture	Demand (MCM)	7	0.2	0	0	0	0	2.8	13.3	24.79	23.04	23.53	18.11
	Coverage (%)	97.7	100	---	---	---	---	100	100	100	100	64.9	43.8



شکل ۶- مقدار حجم آب مورد تقاضای نقاط نیاز (میلیون متر مکعب)

Fig. 6. Water demand volume at demand points (million cubic meters)



شکل ۷- درصد تامین نقاط نیاز

Fig.7. Percentage of demand point supply

ارزیابی سناریوها و نتایج مدیریت تخصیص منابع آب با استفاده از مدل WEAP

مقایسه اثر سناریوهای مرجع و افزایش سطح زیر کشت

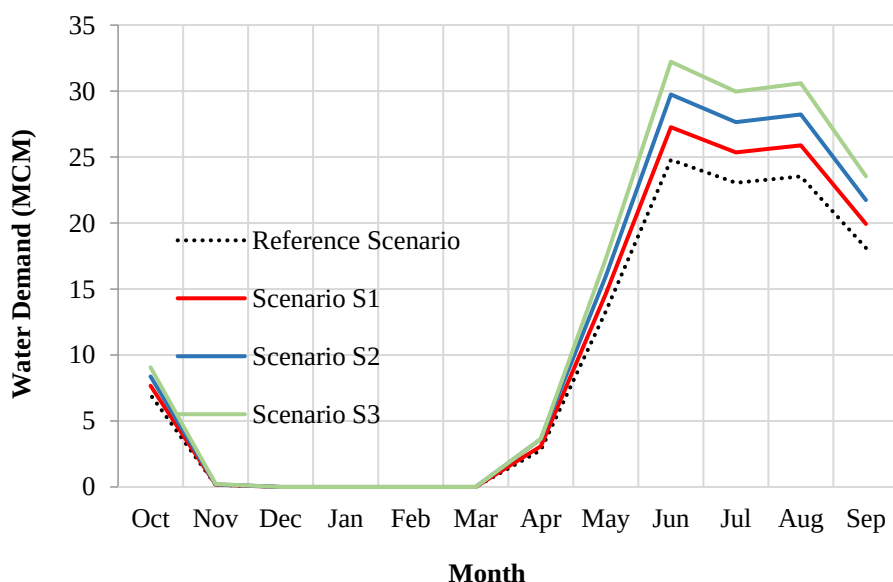
نتایج افزایش سطح زیر کشت (S1، S2 و S3) در جدول (۶) ارائه شده است. بر این اساس در صورت افزایش سطح زیر کشت، میزان تقاضا به ترتیب ۱۰/۵، ۲۱ و ۳۲ میلیون متر مکعب افزایش خواهد یافت و درصد تأمین نیاز در اراضی کشاورزی از ۷۸ در سناریوی مرجع به ترتیب به ۷۴، ۷۳ و ۶۹ درصد در سناریوهای (S1، S2 و S3) کاهش می‌یابد.

در شکل (۸) نمودار سناریوهای افزایش سطح زیر کشت (S1، S2 و S3) و در شکل (۹) درصد پوشش تقاضای کشاورزی در سناریوهای مرجع و افزایش سطح زیر کشت نشان داده شده است. طبق این سناریو میزان کل تقاضای کشاورزی از ۱۱۲/۷۱۵ میلیون مترمکعب در سال (سناریوی مرجع) به ۱۴۶/۵۳۰ میلیون مترمکعب در سال (سناریوی S3) افزایش پیدا خواهد کرد.

جدول ۶- تغییرات تقاضا و درصد تأمین نیاز نسبت به سناریوی مرجع تا انتهای سال ۲۰۴۰

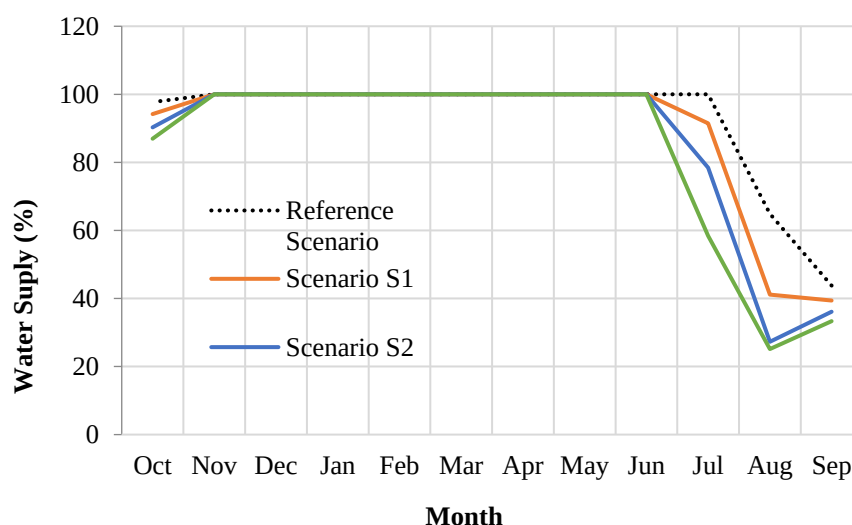
Table 6- Changes in demand and supply percentage compared to the reference scenario until the end of 2040

Demand Point			Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Agriculture	Reference	Demand (MCM)	7	0.2	0	0	0	0	2.8	13.3	24.79	23.04	23.53	18.11
		Coverage(%)	97.7	100	---	---	---	---	100	100	100	100	64.9	43.8
	S ₁	Demand (MCM)	7.67	0.18	0	0	0	0	3.08	14.63	27.26	25.35	25.88	19.93
		Coverage(%)	94.20	100	---	---	---	---	100	100	100	91.48	41.16	39.40
	S ₂	Demand (MCM)	8.37	0.2	0	0	0	0	3.36	15.96	29.74	27.65	28.23	21.74
		Coverage(%)	90.27	100	---	---	---	---	100	100	100	78.44	27.28	36.11
	S ₃	Demand (MCM)	9.07	0.22	0	0	0	0	3.64	17.29	32.22	29.96	30.59	23.55
		Coverage(%)	86.95	100	---	---	---	---	100	100	100	58.40	25.14	33.33
	Reference	Demand (MCM)	1.78	1.74	1.72	1.27	1.27	1.27	1.78	1.83	1.93	2.15	2.58	2.15
		Coverage(%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	S ₄	Demand (MCM)	2.47	2.41	2.39	1.77	1.77	1.77	2.47	2.53	2.68	2.98	3.58	2.98
		Coverage(%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100



شکل ۸- میزان تقاضای کشاورزی در سناریوهای مرجع و افزایش سطح زیر کشت (MCM)

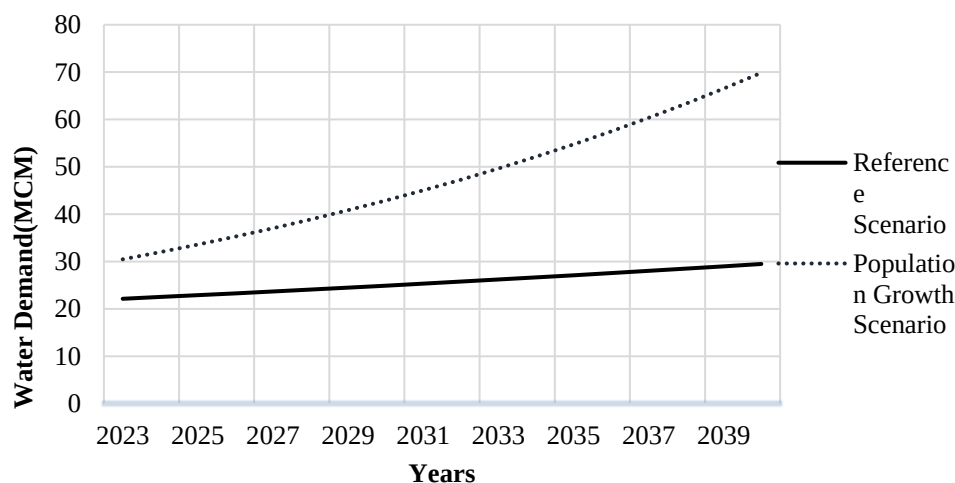
Fig.8. Agricultural water demand in the reference and cultivated area expansion scenarios (MCM)



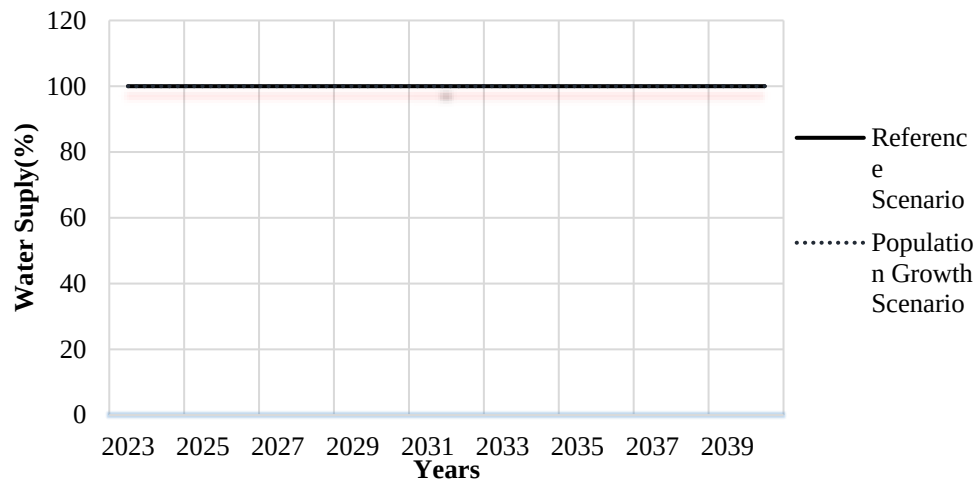
شکل ۹- درصد پوشش تقاضای کشاورزی در سناریوهای مرجع و افزایش سطح زیرکشت
Fig. 9. Percentage of agricultural demand coverage in the reference and cultivated area expansion scenarios

مقایسه اثر سناریوهای مرجع و افزایش نرخ رشد جمعیت بر تأمین تقاضای آب در منطقه

نتایج مربوط به سناریوی S4 در جدول (۶) و اشکال (۱۰) و (۱۱) نشان می‌دهند که در صورت تغییر نرخ رشد جمعیت از ۱/۷٪ به ۵٪ مقدار تقاضا تا آخر سال ۲۰۳۰، ۱۵/۲۷ میلیون مترمکعب افزایش می‌یابد و از ۲۲ میلیون مترمکعب در سال به ۳۰/۵۰ میلیون مترمکعب در سال خواهد رسید. درصد تأمین نیاز شرب شهر مهاباد تغییر نخواهد کرد و ۱۰۰٪ آن قابل تأمین خواهد بود.



شکل ۱۰- میزان تقاضای شهر مهاباد در سناریوهای مرجع و افزایش نرخ رشد جمعیت (MCM)
Fig.10. Water demand of Mahabad City in the reference and population growth rate increase scenarios (MCM)



شکل ۱۱- درصد پوشش تقاضای شهر مهاباد در سناریوهای مرجع و افزایش نرخ رشد جمعیت
Fig.11. Percentage of Mahabad City demand coverage in the reference and population growth rate increase scenarios

شاخص اطمینان پذیری (RE)

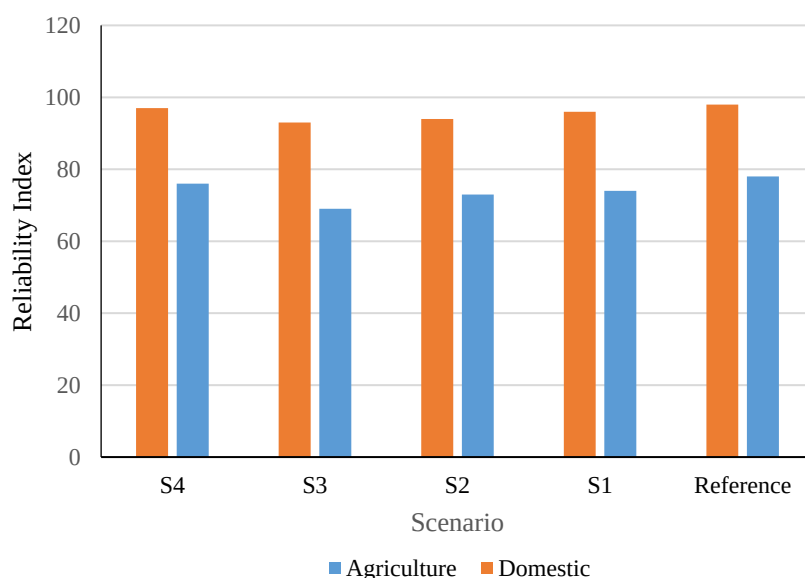
مقادیر برآوردشده از شاخص اطمینان پذیری (RE) که مبنای ارزیابی سناریوهای تعریف شده می‌باشد، در جدول (۷) و شکل (۱۲) ارائه شده است.

همانطور که در جدول و نمودار پایین مشاهده می‌گردد، در نقطه نیاز کشاورزی سیستم موفق عمل کرده و در تمامی سناریوهای اعمالی شاخص اطمینان پذیری بالای ۶۰ درصد است که بیشترین آن مربوط به سناریوی مرجع با ۷۸ درصد و کمترین آن مربوط به سناریوی S3 با ۶۹ درصد می‌باشد. در نقطه نیاز شهری نیز همانطور که مشخص است در تمامی سناریوها شاخص اطمینان‌پذیری بالای ۹۰ درصد بوده و سیستم موفق عمل کرده است. بالاترین مقدار این شاخص مربوط به سناریوی مرجع با ۹۸ درصد و کمترین آن مربوط به سناریوی S3 با ۹۳ درصد می‌باشد. بنابراین در تمامی سناریوها توانایی تامین آب شرب مطمئن وجود دارد.

جدول ۷- شاخص ارزیابی سناریوهای تعریف شده

Table 7- Evaluation indices of the defined scenarios

Demand Point			
Scenario	Index	Domestic	Agriculture
Reference	RE(%)	98	78
S ₁		96	74
S ₂		94	73
S ₃		93	69
S ₄		97	76



شکل ۱۲- شاخص اطمینان پذیری بر حسب درصد در سایت‌های کشاورزی و شهری
Fig.12. Reliability index (percentage) in agricultural and urban sites

در دو دهه اخیر در سراسر جهان سعی شده است استفاده از منابع آب محدود و تخصیص آن به مصرف کنندگان، با نگرشی یکپارچه انجام شد و در همین راستا، مدل‌های مختلفی به منظور شبیه‌سازی مدیریت یکپارچه منابع آب و ارزیابی چگونگی تخصیص منابع آب محدود میان مصرف‌کنندگان گوناگون توسعه یافته‌اند. در پژوهش حاضر وضعیت منابع آب با مدل WEAP شبیه‌سازی شد و سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت و میزان تخصیص آب در دوره پایه و تحت سناریوهای افزایش رشد جمعیت و افزایش سطح زیر کشت مقایسه شدند. با توجه به نتایج حاصل از مدل WEAP می‌توان نتیجه گرفت در حالت پایه در فصل تابستان که بیشترین مقدار تقاضا برای آب در بخش کشاورزی وجود دارد، تمام تقاضا برآورده نمی‌شود و تقاضای تأمین نشده وجود خواهد داشت. این وضعیت در سناریوهای افزایش سطح زیر کشت تشدید خواهد شد. به طوری که مقدار تقاضای تأمین نشده از ۱۸ میلیون مترمکعب در سال به ۵۲ میلیون مترمکعب خواهد رسید. با توجه به اولویت تأمین تقاضای در یک مقایسه کلی بخش شهری نسبت به سایر بخش‌های تقاضا و با توجه به این نکته که تا زمانی که نیاز این بخش به طور کامل تأمین نشود ناچار به کاهش آب اختصاص یافته به سایر بخش‌های تقاضا نظیر کشاورزی، محیط زیست و صنعت خواهیم بود لذا در تأمین نیاز شرب و خانگی شهر مهاباد کمبودی پیش نخواهد آمد. با تأکید بر این واقعیت که عمده مصرف آب در بخش کشاورزی است لذا هرگونه سناریویی که مستقیماً بخش کشاورزی را هدف قرار دهد دارای بیشترین تأثیرگذاری در به تعادل رساندن عرضه و تقاضای آب در منطقه طی سال‌های آتی منطقه خواهد بود لذا می‌توان نتیجه گرفت که صرف نظر از نیازهای شرب و صنعت که قرار است در همه سناریوها به طور کامل تأمین شوند، نیاز کشاورزی کمترین

درصد اطمینان پذیری را از میان سایر نیازها دارد. بررسی شاخص اطمینان پذیری نشان می دهد که افزایش سطح زیرکشت، سبب کاهش ۹ درصدی این شاخص نسبت به دوره پایه خواهد شد و همین امر نیاز به مدیریت صحیح منابع آب را تایید می کند (Höllermaun, Giertz & Diekkrüger, 2010). با ادامه روند کنونی و افزایش جمعیت و خصوصا افزایش سطح زیرکشت، امکان رسیدن به تعادل در عرضه و تقاضای آب در حوضه آبخیز سد مهاباد وجود ندارد. البته لازم به ذکر است پژوهش حاضر صرفا برای بررسی سناریوهای مختلف و تاثیر آنها بر درصد تأمین نیاز انجام شده و جنبه های اقتصادی در آن بررسی نشده است. پیشنهاد می شود مطالعات اقتصادی تاثیر هر یک از سناریوها در سطح حوضه آبخیز مهاباد نیز مورد بررسی قرار گیرد.

نتایج این بخش از پژوهش با مطالعات، اکبری و همکاران (Akbari et al., 2023) که به ارزیابی بهره برداری از سدها تحت برنامه های مختلف مدیریتی، مردانیان و همکاران (Mardanian et al., 2020) که به تخصیص بهینه منابع آب حوضه خانمیرزا، شرافتی و سبحانی (Sharafati & Sabhani Sanjbad, 2019) که به بهینه سازی تخصیص آب مخزن سد یامچی، ابریشمچی و همکاران (Abrishamchi et al., 2007) که به تاثیر سناریوهای مدیریت منابع آب حوضه آبخیز رودخانه کرخه و اینگول بلنکینی و مک کنی (Ingol-Blanco & McKinney, 2009) که به شبیه سازی شرایط هیدرولوژی پرداختند، مطابقت داشت. نتایج همگی گویای دقت مناسب مدل در بهینه سازی سیستم های پیچیده و نتایج قابل قبول آن در پیش بینی تخصیص منابع آب می باشند.

نتیجه گیری

با توجه به محدودیت منابع آب در جهان و به خصوص در منطقه مورد مطالعه و همچنین رشد سریع نیازها، نقش مدیریت منابع آب بیش از هر زمان دیگری احساس می شود. در این مطالعه با به کارگیری مدل شبیه سازی WEAP، ارزیابی و مدیریت منابع آب موجود شبکه سد مهاباد واقع در استان آذربایجان غربی و تأمین تقاضا در بخش های شرب، کشاورزی، صنعت و محیط زیست با در نظر گرفتن رشد نیاز آنها در آینده انجام شده است.

مدل WEAP یک چارچوب جامع، منعطف و کاربرپسند برای تحلیل سیاست ارائه می دهد. پس از جمع آوری اطلاعات و شبیه سازی منابع و مصارف سد مهاباد در مدل، سناریوها تدوین و ارزیابی شدند. این مدل با در نظر گرفتن دبی های ورودی، منابع آب ذخیره شده در مخزن سد، انواع نیازهای آبی و اولویت دهی به آنها، میزان اطمینان پذیری و تأمین نیازها را محاسبه می کند. با در نظر گرفتن سه سطح کشت متفاوت و همچنین تغییر نرخ رشد جمعیت، مقادیر تأمین و کمبود برای هر نقطه نیاز برآورد گردید. نتایج نشان می دهد منطقه دشت مهاباد طبق سناریو مرجع با کمبود ۱۸/۸ میلیون متر مکعب و براساس سناریوهای S1، S2، S3 و S4 به ترتیب با کمبود ۳۰، ۴۱، ۵۲ و ۲۱ میلیون متر مکعب روبه رو خواهد شد. با توجه به نتایج بدست آمده از سناریوی مرجع و افزایش نرخ رشد جمعیت، سد مهاباد می تواند تمامی نیازهای شرب را در تمامی ماه های سال برآورد کند. نیاز کشاورزی که دارای بیشترین نیاز در افق ۱۷ ساله است بدون هیچ گونه افزایش سطحی نیز با کمبود

آب مواجه است و افزایش بیشتر سطح اراضی کشاورزی سبب کاهش شدید حجم مخزن سد خصوصاً در ماه‌های تابستان می‌شود. نیاز آبی در ماه‌های خرداد و مرداد حداکثر و به ۲۷ میلیون متر مکعب در ماه می‌رسد. از طرفی این ماه‌ها خصوصاً مرداد جزء کم‌آب‌ترین ماه‌های سال است و مسلماً مدیریت بهره‌برداری از سد می‌تواند نقش بسزایی در تأمین نیازها به خصوص نیاز کشاورزی داشته باشد که با نتایج رحیمی و حافظ‌پرست (Rahimi & Hafez Parast Moddat, 2022)، اکبری و همکاران (Akbari et al., 2023) مطابقت دارد. شبیه‌سازی سناریو های مختلف در WEAP نشان می‌دهد تأمین تقاضاهای کشاورزی از ۶۹ تا ۷۸ درصد متغیر است. همچنین درصد تأمین نیاز شرب سیستم بین ۹۳ تا ۹۸ درصد است. لذا پیشنهاد می‌گردد از هرگونه افزایش سطح اراضی کشاورزی، تبدیل اراضی دیم به آبی و همچنین کاشت محصولات آب بر خودداری گردد.

References

- Abrishamchi, A., Alizadeh, H., Tajrishy, M., & Abrishamchi, A. (2007). Water resources management scenario analysis in Karkheh River Basin, Iran, using WEAP model. *Hydrological Science and Technology*, 23(1/4), 1.
- Akbari, Y., Shamsi, Z., Khani Temeliyeh, Z., & Mirabbasi Najafabadi, R. (2023). Evaluating the operation of dams under different management programs using the WEAP model (case study: Kardeh Dam of Mashhad). *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 2(1), 145-160. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/nawee.2023.409943.1049>
- Bagheri, H. M., & Morid, S. (2013). Comparison of WEAP and MIKE BASIN models in water resources allocation (Case study: Tlavar River). *Journal of Water and Soil Conservation*, 20(1), 151-167. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222069.1392.20.1.8.6>
- Dashti, G., Sani, F., Hosseinzadeh, J., & Majnoni, A. (2022). Evaluation of Agricultural Sustainability Indicators under Climate Change and Water Resources Management Scenarios in Aji Chay Basin. *Agricultural Knowledge and Sustainable Production (Agricultural Knowledge)*, 32(1), 325-341. [In Persian] https://journals.tabrizu.ac.ir/article_14553.html
- Doherty, J. E., & Hunt, R. J. (2010). *Approaches to highly parameterized inversion-A guide to using PEST for groundwater-model calibration* (No. 2010-5169). US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/sir20105169>
- Feizi, A., & Aghajani Jomayran, R. (2021). Allocation and management of water resources in the Yamchi Dam Basin with a scenario analysis approach using the WEAP model. *Journal of Environmental Science and Technology*, 23(9), 89-107. [In Persian] <https://sanad.iau.ir/Journal/jest/Article/837447>
- Hakami-Kermani, A., Babazadeh, H., Porhemmat, J., & Sarai-Tabrizi, M. (2020). An uncertainty assessment of reservoir system performance indices under the climate change effect. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(4), 889-904. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.03.015>
- Höllermann, B., Giertz, S., & Diekkrüger, B. (2010). Benin 2025—Balancing future water availability and demand using the WEAP ‘Water Evaluation and Planning’ System. *Water Resources Management*, 24, 3591-3613. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-010-9622-z>
- Ilich, N. (2024). Dynamic reservoir rule curves—Their creation and utilization. *Journal of Hydrology X*, 22, 100166. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2023.100166>
- Ingol-Blanco, E., & McKinney, D. C. (2009). *Hydrologic model for the Rio Conchos Basin: Calibration and validation*. Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin.
- Layani, G., & Bakhshoodeh, M. (2022). Effects of climate change on the agricultural sector in the Kheirabad River Basin: Application of WEAP Software. *Agricultural Economics Research*, 13(4), 208-223. [In Persian] <https://doi.org/10.30495/jae.2021.21701.2030>
- Lee, A. H., Sieber, J., & Swartz, C. (2005). *WEAP. Water Evaluation and Planning System*. Userguide. Stockholm Environment Institute. Tellus Institute, Boston, MA.

- Mardanian, S., & Abdollahi, K. (2020). Optimal Allocation of Water Resources in Khanmirza Watershed Using WEAP. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 14(49), 11-19. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089554.1399.14.49.7.6>
- Penghan Avaran Consulting Engineers. (2019). Meteorological studies of the Mahabad Dam watershed . [In Persian]
- Pourmohammadi, S., Fatemi, M., Rasaie, F., Hashemi Monfared, S. A., & Khosravi, M. (2021). Effects of weather modification operations on water resources of Khash basin using water evaluation and planning (WEAP) model. *Water and Soil Management and Modelling*, 1(2), 14-24. [In Persian] <https://doi.org/10.22098/mmws.2021.1253>
- Rahimi, B., & Hafez Parast Moddat, M. (2022). Runoff prediction using the SVR model under climate scenarios and estimation of water demands due to its changes in the WEAP model. *New Approaches in Water and Environmental Engineering*, 1(1), 75-90. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/nawee.2022.154268>
- Ramadan, E. M., Shalash, O. S., Fahmy, M. R., & Abdel-Aal, G. M. (2019). Integrated water resource management in Sharkia Governorate, East Nile Delta using numerical evaluation of water management strategies. *Alexandria Engineering Journal*, 58(2), 757-771. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.06.006>
- Sharafati, A., & Sabhani Sanjbad, M. (2019). Optimization of water allocation from the Yamchi Dam reservoir using the WEAP model and multi-criteria evaluation. Paper presented at the Proceedings of the 14th National Conference on Watershed Science and Engineering of Iran, Urmia. [In Persian] <https://civilica.com/doc /1012028>
- Sun, J., Yan, H., Bao, Z., & Wang, G. (2022). Investigating impacts of climate change on runoff from the Qinhuai River by using the SWAT model and CMIP6 scenarios. *Water*, 14(11), 1778. <https://doi.org/10.3390/w14111778>
- Vahdat Mahabad Operation Company. (2019). *Watershed studies of the Mahabad Dam*. West Azerbaijan Regional Water Company. Studies Department .[In Persian]
- Yaghobi, B., Shabanlou, S., & Yosefvand, F. (2014). Simulation of rainfall-runoff using WEAP model (case study: Qaraso basin). *Agricultural Communications*, 2(4), 63-68. http://www.agricommun.com/content/archive%20volumes/volume%202_4/Agri.%20Commun.%202_4_9.pdf



Geomorphic Design and Modeling for Mine Reclamation: A Case Study of the Sangan Iron Ore Mine

Mahvash Naddaf Sangani^a, Seyed Reza Hosseinzadeh^{b*}, José F. Martín Duque^c,
Mahnaz Jahadi Toroghi^d

^a PhD in Geomorphology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^b Professor in Geomorphology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

^c Associate Professor in Geomorphology, Complutense University of Madrid, Madrid, Spain

^d Assistant professor in Geomorphology, Payame Noor University of Mashhad, Mashhad, Iran

Article Info

Abstract

Article history

Received : 3 February 2025

Received in revised form:
3 March 2025

Accepted : 8 March 2025

Available online :
21 March 2025

Keywords:

Geomorphic
Reclamation,
Sangan Iron Ore
Mine,
GeoFluv,
Landform Design,
Ecological
Restoration

Mining is a fundamental industrial activity that plays a crucial role in global economic development by supplying essential raw materials for various sectors, including construction, manufacturing, and energy production. However, despite its economic benefits, mining operations inevitably result in severe environmental degradation, disrupting natural ecosystems, altering hydrological cycles, and contributing to landscape instability. Large-scale excavation, removal of overburden, and waste disposal significantly modify topography, soil structure, and water resources, often leaving behind degraded and unproductive land. The extensive environmental footprint of mining necessitates the development and implementation of effective reclamation strategies to restore the ecological and geomorphological integrity of post-mining landscapes. This study demonstrates that geomorphic reclamation, particularly through the GeoFluv method, represents a scientifically robust and ecologically viable approach to post-mining landscape restoration. By leveraging principles of natural geomorphology and hydrology, this technique offers significant improvements in landform stability, erosion control, and ecological recovery compared to traditional methods. The findings contribute to the growing body of knowledge on sustainable mining reclamation, emphasizing the necessity of adopting science-based, landscape-oriented approaches in post-mining land management.

*.Corresponding author : Dr. Seyed Reza Hosseinzadeh E-mail address: srhosszadeh@um.ac.ir

How to cite this article: Naddaf Sangani, M., Hosseinzadeh, S. R., Duque, J. M., & Jahadi Toroghi, M. (2025). Geomorphic Design and Modeling for Mine Reclamation: A Case Study of the Sangan Iron Ore Mine. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), pp.325-341.
DOI:https://doi.org/10.22067/geoe.h.2025.91975.1545



Extended Abstract

Introduction

Mining is one of the most significant human activities, exerting profound impacts on geomorphological and environmental systems. Large-scale mining operations, in particular, result in substantial alterations to topography, increased slope instability, accelerated soil erosion, a reduction in vegetation cover, and disruptions to hydrological cycles. These changes often disturb the geomorphic and ecological equilibrium of the environment, making the restoration of mined areas essential for re-establishing environmental stability and mitigating adverse effects. In recent years, innovative geomorphic restoration technologies, based on the principles of applied geomorphology and landscape design, have emerged as effective approaches for rehabilitating degraded mining lands. These methods involve simulating natural topography, designing drainage systems that mimic pristine environments, and implementing geomorphic processes to achieve a stable, dynamic equilibrium in the region. Geomorphic restoration techniques not only reduce erosion and enhance slope stability but also facilitate the recovery of natural ecosystems, improve soil permeability, and restore the hydrological functionality of the land. The Sangan Iron Ore Mine, one of the largest mining sites in Iran and the Middle East, exemplifies a mining area that has undergone extensive geomorphological changes due to large-scale extraction activities. With its mountainous topography, semi-arid climate, and distinct geological characteristics, this mine presents various challenges for post-mining restoration. This study examines geomorphic restoration methods applied to the Sangan mine, analyzing their effects on slope stability, erosion control, surface runoff management, and ecological rehabilitation. The primary objective is to develop a scientific and practical approach to mining land restoration, emphasizing geomorphological principles to establish efficient and sustainable reclamation models for similar mining regions.

Material and Methods

The Sangan iron ore mines are considered one of the largest mining areas in Iran and the richest ore deposits in the Middle East, located in a rectangular area with a length of 22 kilometers and a width of 10 kilometers. The materials used in this study include remote sensing tools such as satellite imagery, geological maps, and a 30-meter resolution Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) digital elevation model, and GIS software, in addition to field surveys and GeoFluv software. GeoFluv was employed to design stable and integrated landforms. Inspired by natural fluvial and slope processes, this software facilitates the design of functional drainage networks that align with pre-mining natural hydrological patterns. The primary objective of these designs is to create topographies that not only resemble natural landforms aesthetically but also function effectively in terms of hydrological stability and efficiency.

Results and Discussion

In this study, design input parameters, including local base-level elevation, drainage density, channel lengths, and slopes, were collected from stable reference areas near the mine site. These data were integrated into GeoFluv to generate landforms tailored to the region's topographic and hydrological conditions. The results indicated that the designs developed using this approach led to landforms with high erosion resistance and improved hydrological performance. These landforms not only blend aesthetically and ecologically with the surrounding undisturbed landscapes but also enhance land productivity and long-term stability.

Conclusion

The findings of this paper demonstrate that the geomorphic reclamation approach can serve as an effective and sustainable solution for mine restoration, particularly for open-pit mines, in Iran and beyond. This method not only mitigates the environmental impacts of mining but also contributes to the ecological and economic improvement of the region by creating stable and naturally integrated topographies. This research represents a significant step toward advancing scientific and innovative methods for mine reclamation and the reclamation of degraded lands.



طراحی و مدلسازی ژئومورفیک در بازسازی سایت‌های معدنی

(مطالعه موردی: معدن سنگ آهن سنگان)

مهوش نداف سنگانی^۱، سید رضا حسین زاده^{۲*}، خوزه فرانسیسکو مارتین داک^۳،
مهناز جهادی طرقي^۴

^۱ دانش آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^{۲*} استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳ دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه کمپلوتنسه مادرید، مادرید، اسپانیا

^۴ استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه پیام نور مشهد، مشهد، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله	معدنکاری برای اقتصاد محلی و جهانی حائز اهمیت است، اما این عملیات به طور اجتناب ناپذیری منجر به آسیب های زیست محیطی قابل توجهی می شود و به دلیل این نوع فعالیت ها، پتانسیل اولیه چشم انداز به شدت تغییر می کند که پس از معدن کاری نیاز به بازسازی کاربری های جدید زمین دارد. فناوری های جدید برای بازسازی چشم انداز در دهه های اخیر در کنار شناخت اثرات زیست محیطی و انتظارات اجتماعی حاصل از یک سیستم بازسازی شده و یکپارچه پس از معدنکاری، توسعه و پیشرفت کرده اند. این فناوری امکان بازسازی فرم های زمین پس از معدن کاری را با استفاده از اصول طراحی ژئومورفیک (GeoFluv) فراهم کرده است. مدل سازی و طراحی شبکه های زهکشی در این روش به گونه ای انجام می شود که با هیدرولوژی طبیعی منطقه هماهنگ بوده و منجر به کاهش رواناب سطحی و افزایش نفوذپذیری خاک شود. این رویکرد علاوه بر بهبود عملکرد هیدرولوژیکی، شرایط لازم برای احیای پوشش گیاهی و بازگشت تنوع زیستی را فراهم می آورد. در این پژوهش، طراحی بازسازی ژئومورفیک با استفاده از این روش در معدن سنگ آهن سنگان مورد بررسی قرار گرفته است، به طوری که معیارهای ژئومورفولوژیک، هیدرولوژیک در طراحی فرآیند بازسازی مدنظر قرار گرفته اند تا یک چشم انداز پایدار و یکپارچه پس از معدن کاری ایجاد شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸	
کلمات کلیدی:	
بازسازی ژئومورفیک	
معدن سنگ آهن سنگان	
ژئوفلو	
طراحی اشکال سطح زمین	
بازسازی اکولوژیکی	

مقدمه

استخراج معادن منافع اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی را برای جمعیت بشری جهان فراهم می‌کند. با این حال، معدن‌کاری یک فعالیت به شدت دگرگون‌کننده است که در آن زمین برای استخراج یا بهره‌برداری از یک منبع برداشت می‌شود (Mossa & James, 2013). معادن سطحی بر تمام اجزای اکوسیستم تأثیر می‌گذارد: توپوگرافی، هیدرولوژی سطحی و آب‌های زیرزمینی، خاک، پوشش گیاهی، جانوران، جو و چشم‌انداز (Nicolau, 2003; Duque, Zapico, Oyarzun, García & Cubas, 2015; Tarolli & Sofia, 2016). این باعث بسیاری از اثرات در محل می‌شود. فرسایش خاک یکی از مهمترین موارد است که مانعی بر سر راه موفقیت عملیات بازسازی است (Whisenant, 2005) و رشد پوشش گیاهی را از طریق مکانیسم‌های مختلف حذف دانه‌ها و مواد مغذی از خاک سطحی، حذف مستقیم گیاه و از دست دادن منابع آب از طریق رواناب سطحی تحت تأثیر قرار می‌دهد. فعالیت‌های معدنی همچنین می‌توانند اثرات خارج از سایت داشته باشند که می‌تواند برای محیط زیست بسیار مضر باشد. در این میان، تأثیر بر کیفیت آب مرتبط با بارهای رسوبی بالادست که از چاله‌ها، باطله‌ها یا تأسیسات معدنی به سیستم رودخانه‌ای تخلیه می‌شود، یکی از مضرترین آنها است (Martín-Moreno et al., 2017; McIntyre, Bulovic, Cane & McKenna, 2016; Zapico et al., 2018). مقررات معدنی در کشورهای توسعه یافته بر تضمین پایداری فیزیکی و شیمیایی پسماندها و سایت‌های معادن به عنوان اولین گام تمرکز دارد. یک چشم‌انداز پس از معدن‌کاری به ثبات فیزیکی (و در صورت وجود، پایداری شیمیایی) نیاز دارد. طراحی لندفرم در بازسازی معادن با استفاده از لندفرم‌های خطی یا پلکانی (رویکرد سنتی)، حتی با پوشش گیاهی موفق، اغلب در درازمدت پایدار نیستند. طراحی سنتی بازسازی چشم‌انداز اغلب بر اساس قضاوت ذهنی در مورد ظاهر چشم‌انداز یا کاربری مورد نظر با توجه کمی به عملکرد هیدرولوژیکی مناسب برای انتقال متعادل آب و رسوب از سطح زمین است. «رویکرد سنتی» برای بازسازی زمین معمولاً شکست می‌خورد، زیرا توپوگرافی‌های جدید اغلب خطی با شیب ثابت و یکنواخت یا با تراس‌ها و ساختارهای زهکشی غیرطبیعی هستند. چنین لندفرم‌هایی عملکردهای طبیعی را بازسازی نمی‌کنند و در دراز مدت پایدار نیستند. بدون تعمیر و نگهداری پرهزینه دائمی، بیشتر آنها به تدریج به لندفرم‌های طبیعی پیچیده شبیه می‌شوند (Haigh, 1978; Sawatsky & Beersing, 2014).

در طی چند دهه گذشته، تحقیقات ژئومورفیک رودخانه‌ای روابط متمایزی بین چندین عامل مهم از جمله آب و هوا، دبی، شیب و مواد زمین را مشخص کرده است که کانال‌های آبراهه پایدار را تعریف می‌کنند (William, 1986; Bloom, 1978). ژئومورفولوژی مطالعه میان رشته‌ای و منظمی لندفرم‌ها و مناظر آنها و همچنین فرآیندهای سطح زمین است که آنها را ایجاد کرده و تغییر می‌دهد (IAG, 2014). ژئومورفولوژی می‌تواند نتایج محیطی را به ویژه برای سایت‌هایی که در معرض پویایی زمین در مقیاس بزرگ قرار دارند، تا حد زیادی بهبود بخشد. تقاضا برای معرفی اصول ژئومورفیک در بازسازی معدن در اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ در ایالات متحده و استرالیا توسعه یافت. بازسازی ژئومورفیک که هنوز یک رشته جوان است، راه حلی است که به حل این مشکلات کمک می‌کند. در طول بازسازی ژئومورفیک، منظره به گونه‌ای طراحی و

شکل می‌گیرد که هم از ظاهر و هم - از همه مهمتر - عملکرد طبیعت تقلید کند. در لندفرم‌هایی که منعکس‌کننده شکل‌های طبیعی پایدار هستند، فرسایش خاک به حداقل می‌رسد، بنابراین حفاظت از مواد مغذی آزاد شده در اثر تجزیه، چرخه مواد آلی و تثبیت نیتروژن توسط میکروارگانیسم‌ها به حداکثر می‌رسد. به حداقل رساندن فرسایش خاک باعث افزایش جانمایی پوشش گیاهی می‌شود. اینها کارکردهای کلیدی مورد نیاز برای احیای سرمایه طبیعی در زمین‌های متروک و تخریب شده هستند (Bradshaw, 1997). هدف، برقراری مجدد تعادل دینامیکی خشن بین لندفرم‌ها و فرآیندها است و «تنظیم دقیق» را به فرآیندهای طبیعی واگذار می‌کند (Toy & Chuse, 2005).

در سال‌های اخیر، فناوری‌های نوین بازسازی ژئومورفیک، مبتنی بر اصول ژئومورفولوژی کاربردی و طراحی چشم‌انداز، به‌عنوان رویکردی کارآمد برای بازسازی زمین‌های تخریب‌شده در اثر معدن‌کاری توسعه یافته‌اند. این روش‌ها شامل شبیه‌سازی توپوگرافی طبیعی، طراحی سیستم‌های زهکشی مشابه با محیط‌های بکر، و به‌کارگیری فرآیندهای ژئومورفولوژیکی در جهت ایجاد تعادل دینامیکی پایدار در منطقه است. روش‌های بازسازی ژئومورفیک علاوه بر کاهش فرسایش و افزایش پایداری دامنه‌ها، زمینه را برای احیای اکوسیستم‌های طبیعی، افزایش نفوذپذیری خاک، و بازیابی عملکرد هیدرولوژیکی زمین فراهم می‌کنند.

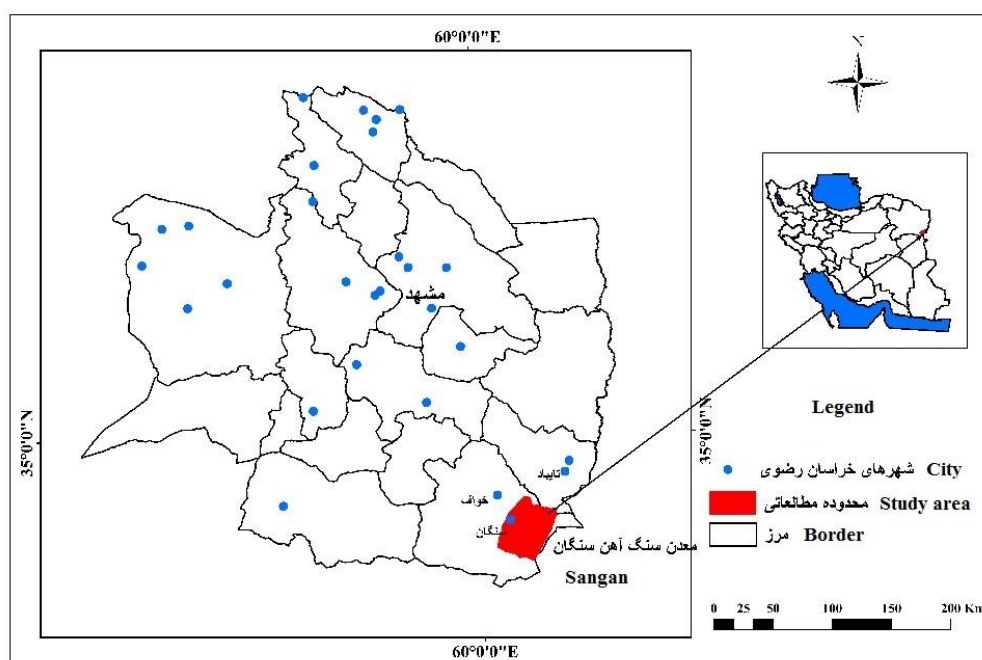
یکی از موفق‌ترین نمونه‌های ساخته شده، معدن زغال سنگ روباز لا پلاتا در نیومکزیکو است (Bugosh & Epp, 2019). بازسازی ژئومورفیک معادن در کانادا (Sawatsky & Beersing, 2014) و استرالیا نیز اعمال می‌شود (Kelder, Waygood & Willis, 2016). اسپانیا نمونه‌های قابل توجهی در این زمینه دارد (Zapico, Molina, Laronne, Castillo & Duque, 2020).

استخراج مجموعه معادن سنگان در بخش‌های مختلف به روش استخراج سطحی و روباز صورت می‌گیرد که در سال‌های گذشته با توجه به تقاضاهای روز افزون اقتصادی و بهره‌برداری بیشتر موجب افزایش اختلال و بهم‌ریختگی چشم‌اندازها شده است. از هم‌گسیختگی سطح به طور قابل توجهی بر خاک، جانوران، گیاهان و آب‌های سطحی تأثیر می‌گذارد و در نتیجه بر انواع کاربری زمین تأثیر می‌گذارد. از جمله تغییر دادن توپوگرافی سطح زمین و تغییر دادن شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک که خود عمده‌ترین عامل در از بین بردن گیاهان، بوته‌های سطح زمین، به هم ریختن ترتیب قرارگیری افق‌های خاک، تقلیل پتانسیل باروری خاک می‌باشد. همچنین فعالیت معدنی باعث شده است که سطح در وضعیت تغییر ناپایدار قرار گیرد و مشکلاتی مانند ناپایداری شیب، خطرات زمین‌شناسی و آسیب به محیط زیست را به همراه داشته باشد. مشکل مهمی که وجود دارد این زمین‌ها بعد از برداشت آهن به حال خود رها شده است. با توجه به پیشینه گفته شده هدف از این پژوهش ارائه طراحی بازسازی ژئومورفیک در بزرگترین معدن سنگ آهن ایران و خاورمیانه جهت بازسازی لندفرم‌های آنتروپوژن ناشی از معدنکاری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی

معادن سنگ آهن سنگان از بزرگترین مناطق معدنی در ایران و غنی‌ترین کانسارهای خاورمیانه محسوب می‌شود که در ناحیه‌ای مستطیل شکل با طول ۲۲ کیلومتر و عرض ۱۰ کیلومتر واقع شده است. این ذخایر سنگ آهن حاوی ۱.۲ میلیارد تن مگنتیت با درجه خلوص ۲۷ تا ۶۸٪ آهن است. این معدن در ۳۰۰ کیلومتری جنوب شرقی مشهد و ۱۸ کیلومتری شمال شرقی شهر سنگان با عرض جغرافیایی $34^{\circ} 24'$ تا $34^{\circ} 55'$ شمالی، طول جغرافیایی $60^{\circ} 16'$ تا $60^{\circ} 50'$ شرقی در استان خراسان رضوی (۳۰ کیلومتری غرب مرز افغانستان) شمال شرقی ایران قرار دارد (شکل ۱). منطقه معدنی سنگ آهن سنگان از نظر ژئومورفولوژی واحدهای کوهستان، دشت سر و دشت تراکمی تشکیل شده است (شکل ۲).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

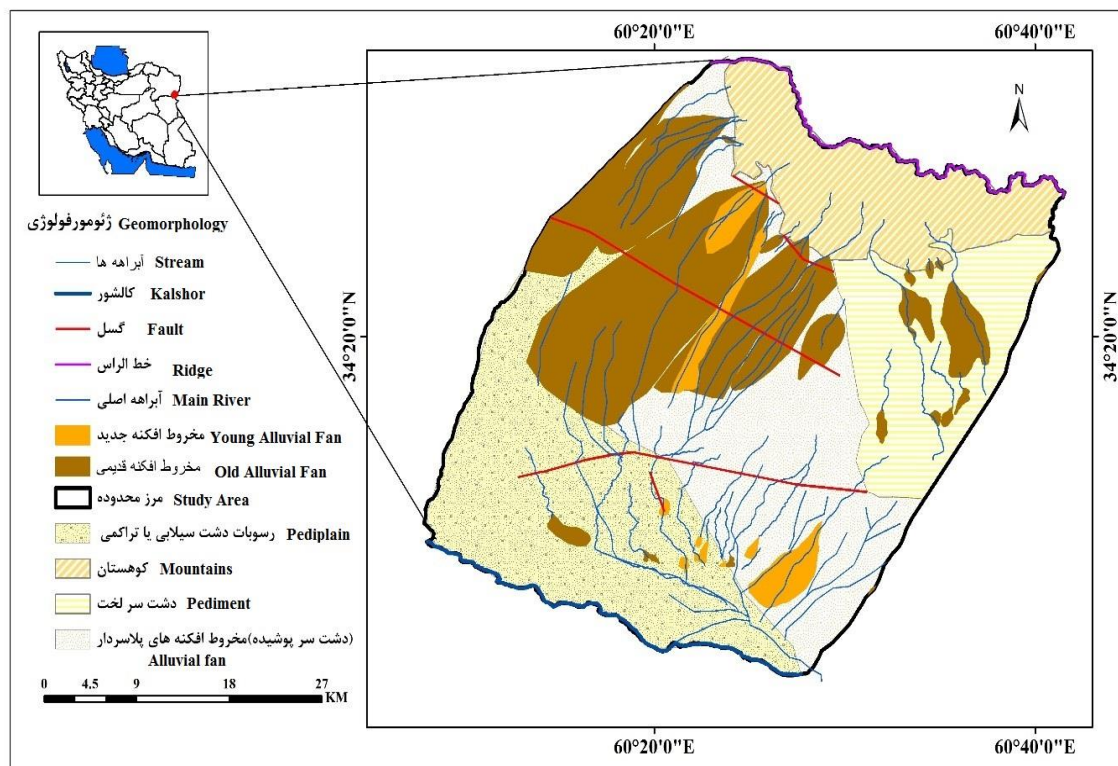
Fig. 1. Location of the study area

روش پژوهش

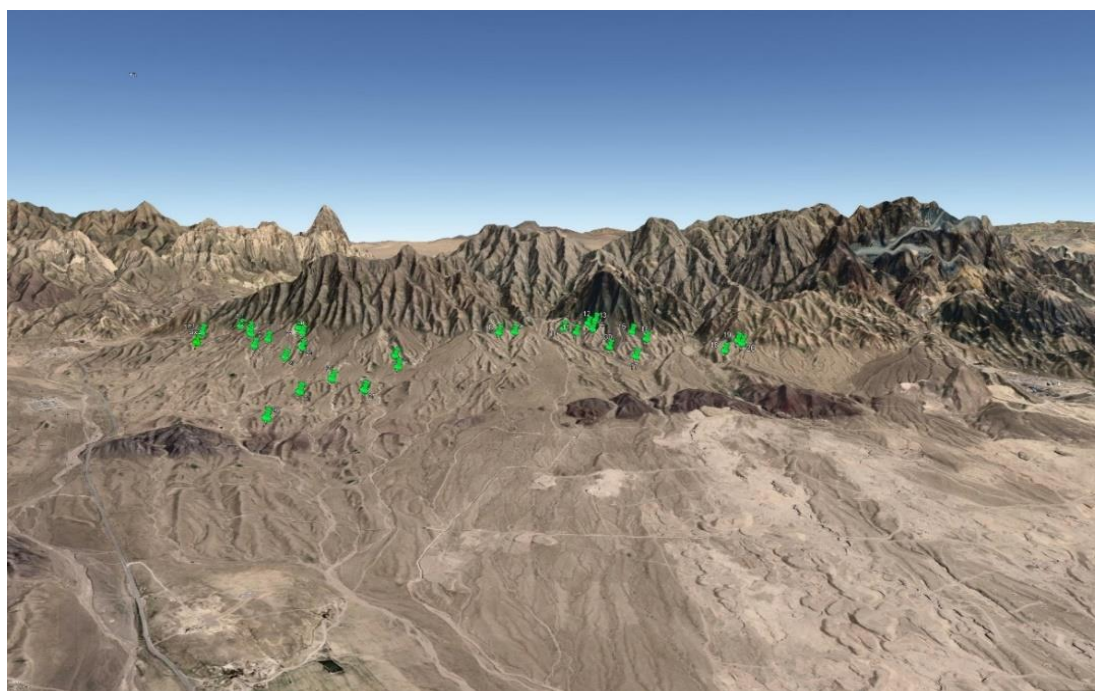
مواد مورد استفاده در این تحقیق ابزارهای سنجش از دور شامل تصاویر ماهواره‌ای، نقشه زمین شناسی و مدل رقومی ارتفاع (SRTM30m) و همچنین بازدیدهای میدانی از منطقه و نرم افزار GeoFluv می‌باشد. برای طراحی مدل بازسازی ژئومورفیک در معدن سنگ آهن سنگان از GeoFluv¹ استفاده شد. GeoFluv اولین بار

1 Geomorphology Fluvial

پس از استفاده موفقیت آمیز آن در معادن زغال سنگ نیومکزیکو که در سال ۱۹۹۹، مورد توجه قرار گرفت. این روش امکان طراحی لندفرم‌هایی را فراهم می‌کند که در پایان درجه‌بندی بازسازی به‌عنوان لندفرم‌های طبیعی بالغ عمل می‌کنند. این روش اساساً زمان را فشرده می‌کند و چشم اندازی با تعادل تقریبی بین نیروها و مقاومت‌های فرسایشی ایجاد می‌کند. برای مقادیر ورودی طراحی باید مناطق مرجع مناسب و پایدار از نظر فرسایش در نزدیکی سایت معدنکاری شده شناسایی شوند. این مقادیر برای ورودی طراحی از مناطق ارتفاعات در نزدیکی شمال غربی معدن از طریق بازدید میدانی و تصاویر ماهواره‌ای جمع‌آوری شد (شکل ۳).



شکل ۲- نقشه واحدهای ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه
Fig.2. Map of geomorphology units of the study area



شکل ۳- موقعیت نقاط اندازه‌گیری مقادیر ورودی

Fig.3. Location of input measurement

نتایج و بحث

استخراج مقادیر ورودی‌های طراحی

ورودی‌های طراحی شامل انبوهی از پارامترهای مورفومتریک چشم انداز، مانند ارتفاع سطح اساس محلی، تراکم زهکشی، طول مستقیم جریان در کانال‌های نوع A با شیب بیشتر از ۴٪، پهنای کانال و فاصله از خط‌الراس تا سر کانال، شیب است. این ورودی‌ها به الگوریتم‌های GeoFluv اجازه می‌دهند تا چشم اندازی با تعداد لازم کانال با پروفیل‌های طولی و عرضی مناسب طراحی کنند تا آب را به طور طبیعی تخلیه کند. علاوه بر این پارامترهای محلی، رویکرد GeoFluv به اطلاعاتی در مورد ارتفاع نقطه زهکشی محلی، شیب کانال در آن نقطه و همچنین برخی اطلاعات در مورد بارندگی محلی و رویدادهای رواناب نیاز دارد. این اندازه‌گیری‌ها بیان می‌کنند که چگونه مواد زمین در منطقه مرجع تحت دامنه وسیعی از شرایط آب و هوایی و پوشش گیاهی که در طول زمان اتفاق افتاده است، پاسخ داده‌اند. بنابراین ما نیاز داریم تا مناطق مرجعی را که در همان شرایط آب و هوایی و مواد زمینی مشابه مناطق معدنی که قرار است بازسازی شود، شناسایی کنیم. منطقه مرجع در ۲ کیلومتری شمال غربی معدن یافت شد. این منطقه لندفرم‌های پایداری داشت که به طور طبیعی بر روی مواد زمین‌شناسی شبیه به موادی که باید بازسازی شوند، ایجاد شده بود، همچنین در شرایط محیطی (اقلیمی) مشابهی با آنچه در معدن سنگ آهن سنگان غالب بود. پایداری ژئومورفیک منطقه با عدم وجود لندفرم‌هایی که فرسایش فعال یا حرکات توده‌ای را نشان دهند (مانند بریدگی، خندق) تعیین شد. مقادیر پارامترهای طول کانال نوع A

(شکل ۴)، فاصله از سر کانال تا خط‌الراس (شکل ۵)، تراکم زهکشی با استفاده از آبراهه‌های حاصله از تصاویر ماهواره‌ای، سینوسیته کانال اندازه‌گیری شد. مقادیر ورودی طراحی در جدول شماره (۱) مطرح شده است.



شکل ۴-اندازه‌گیری میدانی کانال های نوع A

Fig.4. A channel measurement



شکل ۵-اندازه‌گیری خط‌الراس تا سر کانال

Fig.5. Ridge to head of channel measurement

جدول ۱- مقادیر پارامترهای ورودی طراحی

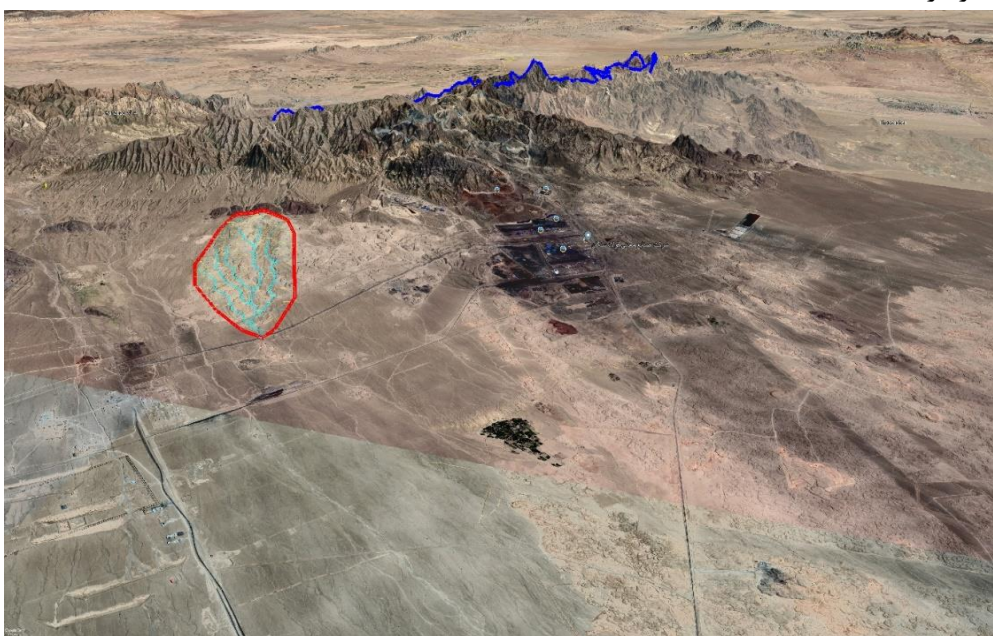
Table1- Design input parameter values

Value	مقادیر	Input parameter	پارامتر ورودی
50m		Ridge to head of channel	فاصله از خط الراس تا سرکانال
90m		Length A channel	طول کانال نوع A
30m/ha		Drainage Density	تراکم زهکشی
1/2		Sinuosity	سینوسیته

طراحی و تنظیم لندفرم با استفاده از GeoFluv

در طرح‌های GeoFluv هدف اصلی طرح‌ریزی شبکه‌های زهکشی کاربردی است. GeoFluv یک روشی است که به دنبال تکرار مناظر مشابه با مناظری است که به طور طبیعی توسط فرآیندهای رودخانه‌ای و شیب تحت شرایط آب و هوایی و فیزیوگرافی در سایت ایجاد می‌شود. برای طراحی محدوده‌ای از زمین‌های تخریب شده ناشی از معدنکاری انتخاب و مطابق داده‌های بدست آمده از منطقه مرجع طراحی با استفاده از GeoFluv انجام شد (شکل ۶).

شکل ۷ یک نمای سه بعدی از خروجی GeoFluv طراح پیشنهادی را برای معدن سنگ آهن سگان نشان می‌دهد. با هدف بازیابی عملکرد مشابه، از لندفرم‌های منطقه مرجع طبیعی تقلید می‌کند و با حجم باطله‌های موجود سازگار است.

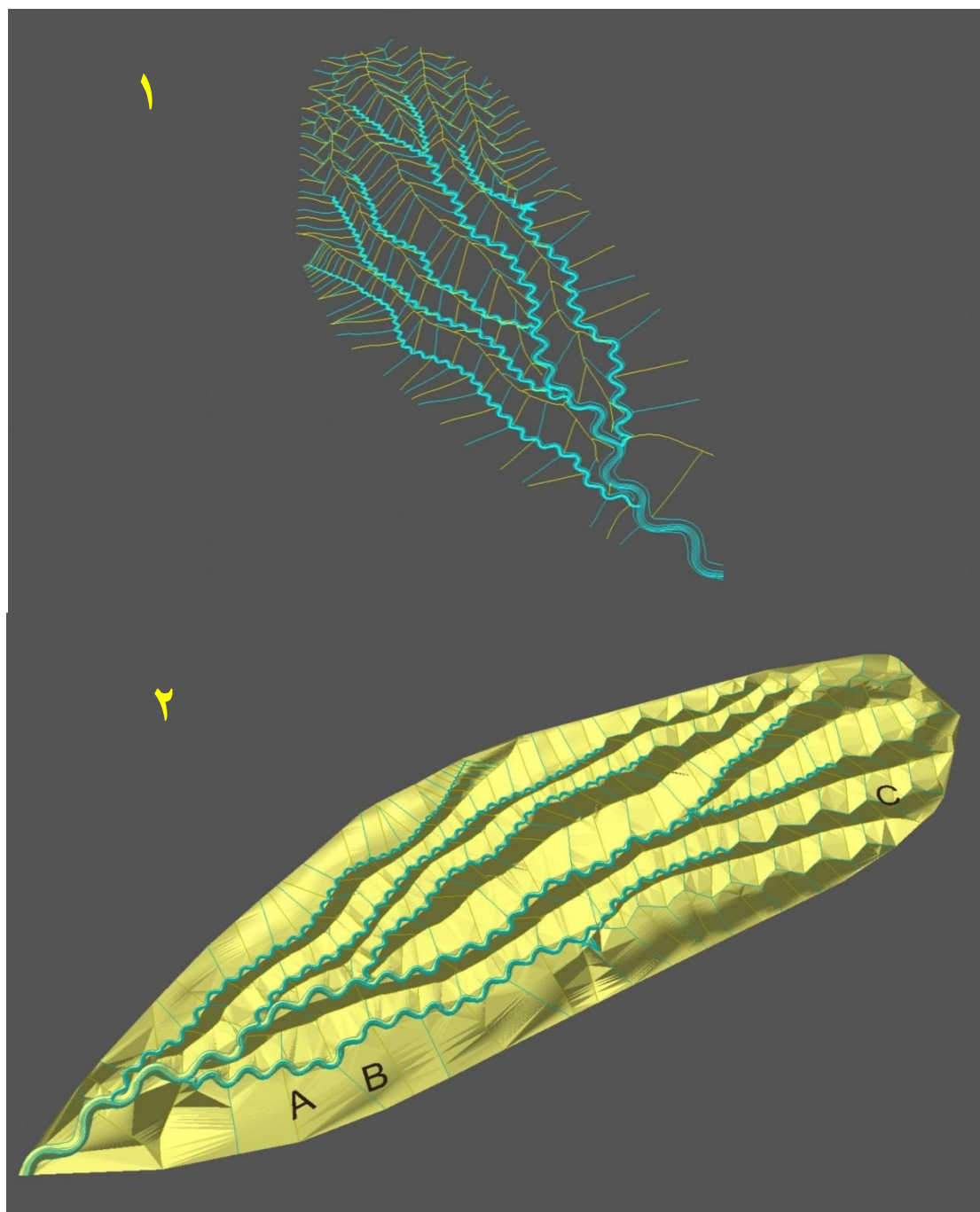


شکل ۶- موقعیت طراحی بازسازی ژئومورفیک در معدن سنگ آهن سگان

Fig.6. Geomorphic reclamation design location in Sangan iron ore mine

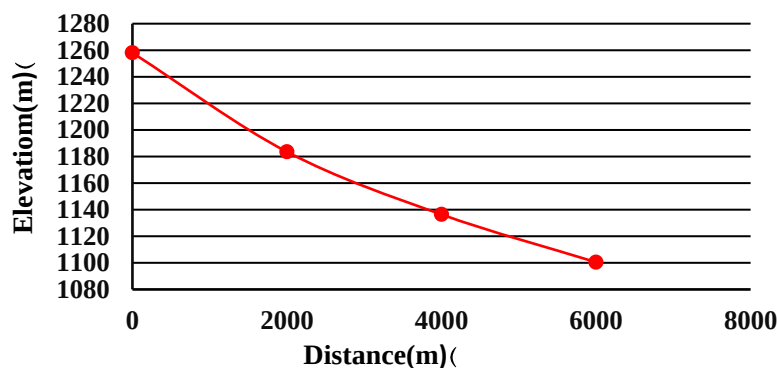
لندفرم‌های طراحی شده (شکل ۷) عبارتند از: (۱) کانال‌های نوع A با شیب بین ۴ تا ۱۰ درصد و کانال‌های Aa+ با شیب بیش از ۱۰ درصد (طبقه بندی روزگن) که هر دو دارای الگوی زیگزاگ مشخصه، سینوسیته کمتر از ۱.۲ بوده و توپوگرافی، متشکل از خط الراس‌ها و خط القعرها. کانال‌های نوع A (زیگ زاگ)، که منجر به یک توپوگرافی محدب-مقعر پیچیده می‌شود. مقادیر ورودی‌های طراحی GeoFluv برای معدن سنگان ۳۰ متر در هکتار تراکم زهکشی، ۱۵۰ متر برای کانال A و حداکثر فاصله ۸۰ متر از خط الراس تا سر کانال است. متوسط شیب کانال‌های ساخته شده ۹.۷ درصد است. خط الراس‌ها و خط القعرها به ترتیب دارای شیب متوسط ۱۷ و ۴۰ درصد هستند. روش GeoFluv شیب‌های پیچیده‌ای را طراحی می‌کند که به طور مداوم در سه بعد تغییر می‌کنند تا انرژی رواناب را از بین ببرند و منبع رسوب را با تخلیه رواناب متعادل کنند، در نتیجه یک حالت پایدار متعادل بدون فرسایش تسریع شده حفظ می‌کنند، درست مانند لندفرم‌های منطقه مرجع طبیعی. بنابراین، مقادیر متوسط شیب زمانی که در بازسازی سنتی لندفرم‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود، ممکن است بالا به نظر برسد.

در شکل (۸) نیمرخ طولی کانال اصلی طراحی نمایش داده شده است. خصوصیات جنس مواد در سطح اساس مشخص می‌کند که پروفیل طولی کانال طراحی باید از شیب پایین دست سطح اساس استفاده کند یا خیر.



شکل ۷- دید سه بعدی (۲و۱) از طراحی ژئومورفوفورفیک منطقه مورد مطالعه (A خط الرأس‌های فرعی (زرد رنگ)، B خط القعرهای فرعی (آبی رنگ)، C کانال‌های نوع A با الگوی زیگزاگی)

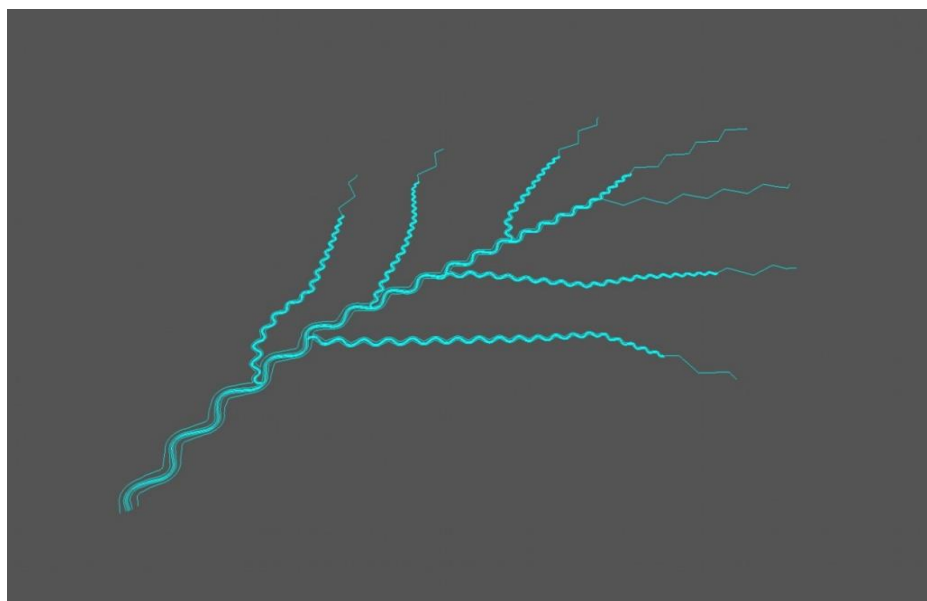
Fig.7. 3D view of the geomorphic design of the study area (A subridge (yellow color), B swales (blue color), C type A channels with zigzag pattern)



شکل ۸- پروفیل طولی آبراهه اصلی طراحی

Fig.8. Longitudinal profile of the main channel of the design

الف) اگر جنس مواد در سطح پایه سست باشد، پروفیل طولی کانال پایین دست باید شیب کانال بالادست سطح اساس را دنبال کند. هنگامی که کانال در مواد ناپایدار (مواد سست مانند آبرفت) تشکیل می‌شود، با کانال رسیده از بالا و پایین جریان سطح اساس با پروفیل طولی مقعر وصل می‌شود. تمام کانال‌های موجود در یک لندفرم پایدار در مواد غیرمتراکم در یک پروفیل طولی مقعر به هم متصل می‌شوند (شکل ۹). توجه داشته باشید که پروفیل صاف و مقعر برای کانال در مواد غیر یکپارچه و سست مناسب است.



شکل ۹- اتصال آبراهه‌ها با پروفیل مقعر

Fig.9. Stream link with concave profiles

اما اگر جنس مواد در سطح پایه یکپارچه و مقاوم باشد، انتهای فوقانی نیمرخ طولی پایین دست می‌تواند در سطح اساس خاتمه یابد و یک پروفایل طولی جدید و متفاوت در بالادست سطح اساس ایجاد کند.

در پروفیل طولی کانال (شکل ۸) پروفیل طولی مقعر در سرچشمه تا جایی که دبی و انرژی فرسایشی کمتری دارد شیب بیشتری دارد و در قسمت‌های پایینی که دبی و انرژی فرسایشی بیشتری دارد صاف‌تر است. این یک ویژگی مهم کاربردی لندفرم‌های پایدار در مواد غیر یکپارچه و سست است. الگوی شبکه آبراهه‌ها در حوضه طراحی شده دندریتیک (شاخه درختی) است (شکل ۹)، زیرا الگوی شاخه درختی الگویی است که تمایل به تشکیل در مواد غیریکپارچه یا سست دارد. نمونه‌هایی از این جنس مواد می‌توانند شامل آبرفت (تراس، دشت سیلاب)، باطله‌ها پس از معدنکاری، رسوبات لغزش زمین، رسوبات یخبندان، لس، و مواد آبرفتی و غیره باشد. استخراج معادن می‌تواند صخره‌های یکپارچه را که قبلاً یک الگوی کانال کنترل ساختاری مانند مثلاً مستطیل شکل داده‌اند (الگوی مستطیل شکل هنگامی که رواناب از شکستگی (اتصالات) در سنگ سخت استفاده می‌کند و دره‌های حاصل از آن دارای کنترل ساختاری هستند، یعنی جهت‌گیری آنها از الگوهای مشترک در سنگ پیروی می‌کند. الگوی مستطیل شکل اغلب در سنگ ماسه سنگ یا سنگ آهک شکل می‌گیرد)، از بین ببرد. سنگ یکپارچه قبل به ماده‌ای غیریکپارچه تغییر یافته است که برای یک دوره در مقیاس زمانی زمین‌شناسی متفاوت رفتار خواهد کرد. تلاش برای مجبور کردن کانال ساخته شده در مواد غیر یکپارچه به یک الگوی ساختاری کنترل شده که در ماده یکپارچه شکل می‌گیرد یک تمرین بیهوده است (یا حداقل، ساخت و نگهداری آن گران است). زمین‌های استخراج شده (یا به شدت مختل شده) عموماً به تراکم زهکشی بیشتری نسبت به زمین دست‌نخورده نیاز دارند، زیرا سنگ بستر (که کمتر فرسایش‌پذیر بود) شکسته می‌شود و بازسازی شامل مواد تحکیم‌نشده‌ای (سست) است که بیشتر فرسایش‌پذیر است. همچنین تراکم زهکشی برای طرح پیشنهادی بازسازی نباید کمتر از تراکم زهکشی قبل از اختلال باشد. اگر تراکم زهکشی طراحی بازسازی کمتر باشد، سایت فرسایش می‌یابد تا اینکه به تراکم زهکشی مطلوبی برسد. همچنین، اگر این سایت در معرض "اثر استروئید"^۱ (به این معنی است که پس از معدنکاری، مواد یکپارچه نیستند و متفاوت از مواد یکپارچه قبل از معدنکاری. یعنی اینکه مواد غیریکپارچه نیاز به تراکم زهکشی بیشتری دارند) باشد، تراکم زهکشی احیاء باید بیشتر از تراکم زهکشی قبل از ایجاد اختلال باشد زیرا مواد غیر یکپارچه تمایل به تشکیل تراکم بیشتر از مواد دست‌نخورده و یکپارچه دارند.

1 Asteroid effect

نتیجه‌گیری

فعالیت‌های معدنکاری سطحی، به‌ویژه در معادن روباز، معمولاً از چند سال تا چند دهه ادامه دارند و در نهایت منجر به تبدیل نواحی تحت معدنکاری به اراضی متروکه می‌شوند. این اراضی، به دلیل تغییرات شدید توپوگرافیک، خاک‌شناسی و هیدرولوژیکی، اغلب به‌عنوان منابع بحران‌زا در مقیاس محیط زیست و انسانی شناخته می‌شوند. معدن سنگ آهن سنگان، با مساحتی معادل ۲۲۳ کیلومتر مربع در واحد ژئومورفولوژی کوهستان و ۱۲۳۳ کیلومتر مربع در قلمرو مخروط‌افکنه‌ها، نمونه‌ای از چشم‌اندازهای آنتروپوژنیک است که با تحولات ژئومورفولوژیکی غیرقابل‌بازگشت همراه بوده و پیامدهای جدی از جمله فرسایش خاک، تخریب پوشش گیاهی، کاهش کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی، و افزایش ریزگردها را به همراه دارد. در این پژوهش، طراحی و مدلسازی ژئومورفیک به‌عنوان یک راه‌حل نوین و کاربردی برای بازسازی معادن متروکه معرفی شده است. این رویکرد، با الهام از فرآیندهای طبیعی ژئومورفولوژیکی، امکان احیای اراضی را در قالب یک سیستم تعادلی پایدار فراهم می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که این تکنیک نه تنها به کاهش پدیده‌های بحران‌زا مانند فرسایش خاک، ریزگردها و آلودگی آب‌ها کمک می‌کند، بلکه به حفظ تنوع زیستی، تغذیه آب‌های زیرزمینی و احیای پوشش گیاهی نیز منجر می‌شود. علاوه بر این، بازسازی ژئومورفیک با توجه به انعطاف‌پذیری و قابلیت تطبیق آن با شرایط مختلف ژئومورفولوژیکی، می‌تواند به‌عنوان یک الگوی عملیاتی برای بازسازی معادن روباز در سراسر ایران مورد استفاده قرار گیرد.

این مطالعه نشان می‌دهد که با اعمال استراتژی‌های ساماندهی و احیای اراضی مبتنی بر مدلسازی ژئومورفیک، می‌توان به اهداف کلیدی توسعه پایدار دست یافت، از جمله:

حفظ و احیای پوشش گیاهی: با ایجاد شرایط اکولوژیکی مناسب برای رشد گیاهان بومی.

کاهش فرسایش خاک: از طریق بازسازی توپوگرافی و تثبیت خاک‌ها.

مدیریت ریزگردها: با کاهش سطوح بدون پوشش و افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت.

تغذیه آب‌های سطحی و زیرزمینی: از طریق طراحی شبکه‌های هیدرولوژیکی متناسب با شرایط منطقه.

در نهایت، این پژوهش نه تنها به عنوان یک مطالعه موردی در معدن سنگ آهن سنگان، بلکه به‌عنوان یک الگوی عملیاتی برای بازسازی علمی و پیشرفته معادن متروکه در سطح کشور مطرح می‌شود. این رویکرد، ضمن تأکید بر اصول پایداری محیط زیست، می‌تواند به کاهش هزینه‌های اجتماعی و اقتصادی ناشی از فعالیت‌های معدنی کمک کرده و گامی مؤثر در جهت توسعه پایدار معادن ایران باشد.

References

- Bloom, A. L. (1978). *Geomorphology, a systematic analysis of late Cenozoic landforms*. New Jersey: Prentice Hall. <https://doi.org/10.1029/98EO00163>
- Bradshaw, A. (1997). Restoration of mined lands—using natural processes. *Ecological Engineering*, 8(4), 255-269. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(97\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(97)00022-0)
- Bugosh, N., & Epp, E. (2019). Evaluating sediment production from native and fluvial geomorphic-reclamation watersheds at La Plata Mine. *Catena*, 174, 383-398. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.048>
- Duque, J. M., Zapico, I., Oyarzun, R., García, J. L., & Cubas, P. (2015). A descriptive and quantitative approach regarding erosion and development of landforms on abandoned mine tailings: New insights and environmental implications from SE Spain. *Geomorphology*, 239, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.035>
- Haigh, M. J. (1978). *The Evolution of Slopes on Artificial Landforms*, Blaenavon, UK. Chicago: University of Chicago Press.
- IAG. (2014). Web site of the International Association of Geomorphologists, IAG. <http://www.geomorph.org/Accessed April 19, 2014>.
- Kelder, I., Waygood, C. G., & Willis, T. (2016). Integrating the use of natural analogues and erosion modelling in landform design for closure. In *Mine Closure 2016: Proceedings of the 11th International Conference on Mine Closure*. Australian Centre for Geomechanics. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1608_04_Kelder
- Martín-Moreno, C., Tejedor, M., Martín Duque, J. F., Nicolau, J. M., Bladé, E., Nyssen, S., ... & Gómez, J. M. (2018). Natural drainage basins as fundamental units for mine closure planning: Aurora and Pastor I quarries. In *Proceedings of the Second International Congress on Planning for Closure of Mining Operations, Gecamin, Santiago*, 1-8. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1915_12_Duque
- McIntyre, N., Bulovic, N., Cane, I., & McKenna, P. (2016). A multi-disciplinary approach to understanding the impacts of mines on traditional uses of water in Northern Mongolia. *Science of the Total Environment*, 557, 404-414. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.092>
- Mossa, J., & James, L. A. (2013). Impacts of mining on geomorphic systems. In Shroder, J. F. (Ed.), *Treatise on Geomorphology* 13. Academic Press, San Diego, pp. 74-95. DOI:10.1016/B978-0-12-374739-6.00344-4
- Nicolau, J. M. (2003). Trends in relief design and construction in opencast mining reclamation. *Land Degradation & Development*, 14(2), 215-226. <https://doi.org/10.1002/ldr.548>
- Sawatsky, L., & Beersing, A. (2014). Configuring mine disturbed landforms for long-term sustainability. *Proceedings of Mine Closure Solutions*, 26-30. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/852_5
- Tarolli, P., & Sofia, G. (2016). Human topographic signatures and derived geomorphic processes across landscapes. *Geomorphology*, 255, 140-161. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.12.007>

- Toy, T. J., & Chuse, W. R. (2005). Topographic reconstruction: a geomorphic approach. *Ecological Engineering*, 24(1-2), 29-35. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.12.014>
- Whisenant, S. G. (2005). First steps in erosion control. In Mansourian, S., Vallauri, D., Dudley, N. (Eds.), *Forest Restoration in Landscapes: Beyond Planting Trees*. Springer (in cooperation with WWF), New York, 350–355. <http://dx.doi.org/10.1007/0-387-29112-1>
- Williams, G. P. (1986). River meanders and channel size. *Journal of Hydrology*, 88(1-2), 147-164. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90202-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90202-7)
- Zapico, I., Laronne, J. B., Martín-Moreno, C., Martín-Duque, J. F., Ortega, A., & Sánchez-Castillo, L. (2017). Baseline to evaluate off-site suspended sediment-related mining effects in the Alto Tajo Natural Park, Spain. *Land Degradation & Development*, 28(1), 232-242. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90202-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90202-7)
- Zapico, I., Molina, A., Laronne, J. B., Castillo, L. S., & Duque, J. F. M. (2020). Stabilization by geomorphic reclamation of a rotational landslide in an abandoned mine next to the Alto Tajo Natural Park. *Engineering Geology*, 264, 105321. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105321>

GEOGRAPHY AND ENVIRONMENTAL HAZARDS

(Research Journal)
VOLUME 14, NO 53, Spring 2025



CONTENTS

- **Forecasting Precipitation and Temperature in the Qareh-Sou Watershed: Emphasizing Model Uncertainties** 1
Golale Ghaffari, Ali Salajegh
- **Spatial Analysis of Soil Erosion and Habitat Quality Based on Land Use Patterns in Sistan Region, Eastern Iran** 22
Mohammad Amin Izadipoor, Reza Dahmardeh Behrooz, Fatemeh Eynollahi Pir, Fatemeh Rajaei
- **Identifying Factors Affecting Landslides on Astara Road to Namin Tunnel Using the MLP Model** 43
Fariba Esfandiari Darabad, Mehrdad Vahabzadeh, Zohreh Sheikhli, Behrouz Nezafat Taklhe
- **Impact of land use types on bioavailable form of heavy metals and soil environmental pollution** 61
Ebrahim Mahmoudabadi, Morteza Akbari, Ferydoon Sarmadian
- **Evaluation of the seismic potential of Herat Fault in the west of Afghanistan based on Seismotectonic Parameters and Seismic Moment rate** 79
Amin Mohammadi, Saeed Zarei
- **Vulnerability analysis of facilities against flood with emphasis on AHP Fuzzy method (case study: Khorramabad city)** 99
Amir Rahimi, Mahin Nastaran
- **Evaluation of Semi-distributed (SWAT) and Lumped (SMAR) Hydrological Models in Rainfall-runoff Estimation and Simulation, Case Study: Ojan chay drainage basin** 123
Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam, Fariba Karami, Kolsom Abazari
- **A Meta-Analysis and Systematic Review of Integrating Satellite-Derived Aerosol Optical Depth Data with Machine Learning for Estimating Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Concentrations** 151
Rasool Taherian Esfahani, Mehdi Ghanbarzadeh Lak
- **Investigation of storm variability using the Gordji method (case study: Mazandaran province)** 187
Saina Vakili Azar, Yagob Dinpashoh, Saeed Jahanbakhsh Asl
- **Estimating the amount of erosion and sedimentation in Zimkan watershed basin in Kermanshah province with an emphasis on influencing variables** 210
Shahram Roostaei, Seyyed Asadullah Hijazi, Hedieh Shirzadi
- **Subsidence Monitoring in Railway Lines With LICSBAS Algorithm and Radar Interferometric Method (Case Study: Mashhad-Sarkhs Railway)** 227
Soroush Yasini, Hossein Etemadfard
- **Assessment of landslide sensitivity and determination of effective factors in its occurrence using the random forest algorithm (Case study: Glandrood watershed)** 247
Ali Gilanipoor, Sadroddin Motevalli, Khabat Derafshi
- **Evaluation of relationship between soil quality index and organic carbon changes as a function of different land uses (Case study: Sahand region of East Azerbaijan province)** 275
Solmaz Bidast, Ahmad Golchin
- **Investigating the impact of increasing cultivated area and population growth on the surface water resources of the Mahabad Dam Basin using the WEAP model** 299
Nezamoddin Mahmoudi, Hiran Abaghari
- **Geomorphic Design and Modeling for Mine Reclamation: A Case Study of the Sangan Iron Ore Mine** 325
Mahvash Naddaf Sangani, Seyed Reza Hosseinzadeh, José F. Martín Duque, Mahnaz Jahadi Toroghi

GEOGRAPHY AND ENVIRONMENTAL HAZARDS

Editor-in-Chief:
Dr. S. R. Hosseinzadeh
Department of Geography
Ferdowsi University of Mashhad,
Mashhad, Iran

Executive Manager:
Sayyed Mohammad Ali Moosavi

English Language Editor:
Maryam Mohammadi Shandiz

Director:
Dr. S. R. Hosseinzadeh
Department of Geography
Ferdowsi University of Mashhad,
Mashhad, Iran

Managing Editor:
Dr. Masoud Rahimi

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
Senior Research Fellow
University of Oulu, Finland

Dr. Dimitris G. Kaskaoutis
Chemical Engineering
University of Western Macedonia: Kozani, Greece

Professor. Mingrui Qiang
Arid Environment and Climate Change
Lanzhou University Lanzhou, China

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 Valizadeh Kamran
Department of Remote Sensing and GIS
Tabriz University, Tabriz, Iran

Dr. Mojtaba Yamani
Department of Physical Geography
University of Tehran, Tehran, Iran

Dr. Azar Zarrin
Department of Geography Ferdowsi
University of Mashhad, Mashhad, Iran

Iranian Editorial Board:

Dr. Morteza Akbari
Department of Natural Resources and Environment
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Dr. Hamid Ejtehad
Department of Biology, Sciences
Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Dr. Mohammad Reza Esfehiani
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
University of Alkharazmi, Tehran, Iran

Dr. Alireza Karimi
Department of Soil Sciences
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

Journal of Geography and Environmental Hazards is an Iranian interdisciplinary research journal that highlights issues of Geography such as geographic risk degree of regions, human exposure to risk, vulnerability, awareness, responses to disasters and planning to adjust the effect of environmental hazards.

Also, the role of hazards in affecting development process particularly in developing countries and issues of efficiency, social justice and sustainability are also discussed in the journal.

Scopes

This journal welcomes high-quality Original, Research articles, Review articles, short paper, Case study, Methodology, Applied articles on the following themes:

- 1. Geological and Geomorphological Hazards: Earthquakes, soil liquefaction, volcanic eruptions, lahars, tsunamis, land subsidence, landslides, rock slides, solifluction, mud flows, rockfalls, debris flows, avalanches, **coastal** erosion, water erosion, wind erosion, sand dune displacement, salt weathering.
- 2. Hydrological-Geomorphological Hazards: Floods, inundation, sea-level fluctuations, saltwater intrusion, desertification, aridity.
- 3. Climatic and Atmospheric Hazards: Climate change, dust storms, firestorms, blizzards, tornadoes, climatic extremes, droughts, severe frost, heatwaves, fog, lightning, cosmic radiation, ultraviolet radiation.
- 4. Biophysical and Biological Hazards: Natural forest fires, agricultural frosts, allergies, viruses, influenza, food poisoning, epidemics, specific diseases such as cancer, plant diseases and pests, insect infestations.
- 5. Technological Hazards: Air, soil, and water pollution, industrial pollution, chemical pollution, noise pollution, atomic radiation, electronic waste, nuclear waste, dam failures, transportation accidents, fires, chemical spills.
- 6. Social and Cultural Hazards: Mental health issues, anger, stress and depression, ethnic and communal conflicts, theft, drug addiction, ground wars, modern warfare, political conflicts, border disputes, risky behaviors, urban and rural hazards.
- 7. Environmental Hazard Management: Crisis management, active management, passive management, rescue and relief, post-hazard reconstruction, planning for impact reduction.

GEOGRAPHY AND ENVIRONMENTAL HAZARDS

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,.

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: 3–6 words
- References: 20–50 for research articles; 50–300 for review articles
-

GEOGRAPHY AND ENVIRONMENTAL HAZARDS

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: 14
 - Main headings: 13 (bold)
 - Body text: 13
 - Latin text: 12
 - Scientific names: Italic
 - Captions for figures and tables: 12 (Persian), 11 (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, 12, Bold; English: Times New Roman, 12, 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, 12; English, Times New Roman, 12).

Mathematical Equations

- Present equations in two-column invisible tables.
- Number equations sequentially, enclosed in parentheses.
- Use Times New Roman, font size 11, for equations.

Units of Measurement

- Follow the SI (metric) system.
- Use exponential notation (e.g., m s^{-1} instead of m/s).

GEOGRAPHY AND ENVIRONMENTAL HAZARDS

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 4,000,000 IRR 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.

GEOGRAPHY AND ENVIRONMENTAL HAZARDS

Contents (Abstracts)

VOLUME 14, NO 53, Spring 2025

Pages

• Rockfall risk zoning on The Khalkhal to Shahroud road using multilayer perceptron algorithm Fariba Esfandiyari Darabad, Masoud Rahimi, Mehrdad Vahabzadeh	1
• Evaluating water yield ecosystem services through land use and land cover impacts in the ecosystems of Sistan region Mohammad Amin Izadipoor, Reza Dahmardeh Behrooz, Fatemeh Einollahipeer, Fatemeh Rajaei	27
• Modeling of land subsidence of Salmas plain by using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) Maryam Bayati Khatibi, Ruhullah Mohammadzadeh, Sadra Karimzadeh	48
• Vulnerability assessment of Helen Forest protected area to multiple environmental hazards Farideh Saeidianpour, Ali Jafari, Davood Mafi-Gholami	74
• Wildfire risk modeling using remote sensing methods and fire behavior simulation in Guilan province Roghayeh Jahdi, Mohammad Vasegh Alhaj khalaf	102
• The Relationship Between Quantitative and Qualitative Networks of Groundwater with the Characteristics of Alluvial fan in The ... Ali Rajabi Eslami, Manijeh Ghahroudi Tali, Alireza Salehipour Milani	130
• Comparison of different multi-criteria decision-making methods in flood prioritization of Kashafrud sub-basins Maryam Zare, Mahmood Azari, Mohsen Rezaei Arefi	159
• Investigating the Maximum Wind Speed and Wind Direction of Synoptic Stations in the East of Lake Urmia Pouya Allahverdipour, Mohammad Taghi Sattari	197
• Spatial and temporal analysis of earthquakes in Iran During the years 1907 to 2023 Hamid Ganjaeian	222
• Simulation and forecasting of some climatic variables by SDSM multiple linear model and RCP scenarios in Hajiler watershed SeyedAsdollah Hejazi, Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam, Jamshid Yarahmadi, Fariba Karami, Ali Bigham	244
• Evaluation of spatial-temporal land use changes based on qualitative ecological indicators (Case study: Zaribar Lake Basin) Mahin Saedpanah, Jamil Amanollahi	269
• Evaluation of meteorological data and satellite images in identifying dust phenomenon in desert areas (Case study: Kerman province) Peyman Madanchi, Hamzeh Saeediyani, Mahmood Damizadeh	291
• Spatial-Temporal behavior of the reactivation of the paleolandslide in Hossein abad Village, Kalpush, Northeast of Iran Mahdieh Ghayoor Bolorfroshan, Seyed Reza Hosseinzadeh, Gholam Reza Lashkaripour, Masoud Minaei, Hakimeh Morabbi Heravi	314
• The role of Social Capital to Improve the Resilience of Rural Households in Drought Conditions (Case Study: Mashhad Township) Mehri Jahansoozi, Hossein Farahani, Jamshid Einali, Behrooz Mohammadi Yeganeh	344
• Identifying the centers of dust and analyzing the factors influencing its occurrence Based on Remote Sensing Data (Case Study: Southwest Iran) Saeed Negahban, Hamid Ganjaeian, Seyed Saedi Ghisarian, Atrin Ebrahimi	386



JOURNAL OF GEOGRAPHY AND ENVIRONMENTAL HAZARDS



Research Journal

Volume. 14, No. 1, Spring 2025

- **Forecasting Precipitation and Temperature in the Qareh-Sou Watershed: Emphasizing Model Uncertainties**
Golale Ghaffari, Ali Salajegh
- **Spatial Analysis of Soil Erosion and Habitat Quality Based on Land Use Patterns in Sistan Region, Eastern Iran**
Mohammad Amin Izadipoor, Reza Dahmardeh Behrooz, Fatemeh Eynollahi Pir, Fatemeh Rajaei
- **Identifying Factors Affecting Landslides on Astara Road to Namin Tunnel Using the MLP Model**
Fariba Esfandiari Darabad, Mehrdad Vahabzadeh, Zohreh Sheikhhr, Behrouz Nezafat Taklhe
- **Impact of land use types on bioavailable form of heavy metals and soil environmental pollution**
Ebrahim Mahmoudabadi, Morteza Akbari, Ferydoon Sarmadian
- **Assessing the Vulnerability of Power Distribution Network to Natural Flood Hazards: A Case Study of the Behdan Watershed in Birjand County**
Amin Mohammadi, Saeed Zarei
- **Vulnerability analysis of facilities against flood with emphasis on AHP Fuzzy method (case study: Khorramabad city)**
Amir Rahimi, Mahin Nastaran
- **Evaluation of Semi-distributed (SWAT) and Lumped (SMAR) Hydrological Models in Rainfall-runoff Estimation and Simulation, Case Study: Ojan chay drainage basin**
Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam, Fariba Karami, Kolsom Abazari
- **A Meta-Analysis and Systematic Review of Integrating Satellite-Derived Aerosol Optical Depth Data with Machine Learning for Estimating Fine Particulate Matter (PM2.5) Concentrations**
Rasool Taherian Esfahani, Mehdi Ghanbarzadeh Lak
- **Investigation of storm variability using the Gordji method (case study: Mazandaran province)**
Saina Vakili Azar, Yagob Dinpashoh, Saeed Jahanbakhsh Asl
- **Estimating the amount of erosion and sedimentation in Zimkan watershed basin in Kermanshah province with an emphasis on influencing variables**
Shahram Roostaei, Seyyed Asadullah Hijazi, Hedieh Shirzadi
- **Subsidence Monitoring in Railway Lines With LICSBAS Algorithm and Radar Interferometric Method (Case Study: Mashhad-Sarkhs Railway)**
Soroush Yasini, Hossein Etemadfar
- **Assessment of landslide sensitivity and determination of effective factors in its occurrence using the random forest algorithm**
Ali Gilanipoor, Sadroddin Motevalli, Khabat Derafshi
- **Evaluation of relationship between soil quality index and organic carbon changes as a function of different land uses**
Solmaz Bidast, Ahmad Golchin
- **Investigating the impact of increasing cultivated area and population growth on the surface water resources of the Mahabad Dam Basin using the WEAP model**
Nezamoddin Mahmoudi, Hiran Abaghari
- **Geomorphic Design and Modeling for Mine Reclamation: A Case Study of the Sangan Iron Ore Mine**
Mahvash Naddaf Sangani, Seyed Reza Hosseinzadeh, José F. Martín Duque, Mahnaz Jahadi Toroghi



دانشگاه همدان



دانشگاه علوم کشاورزی و علوم طبیعی کرمان



دانشگاه سیستان و بلوچستان



دانشگاه خوارزمی تهران



دانشگاه تبریز



دانشگاه اصفهان

ISSN:2322-1682

Published by

Ferdowsi University of Mashhad